

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

27.12.2004

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2003年11月27日

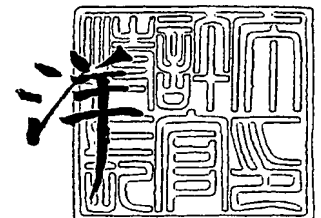
出 願 番 号
Application Number: 特願2003-398171
[ST. 10/C]: [JP2003-398171]

出 願 人
Applicant(s): 本田技研工業株式会社

2005年 2月10日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川



【書類名】 特許願
【整理番号】 PSK71561HW
【提出日】 平成15年11月27日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 B25J 5/00
G05D 1/02

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 竹中 透

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 松本 隆志

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 吉池 孝英

【特許出願人】
【識別番号】 000005326
【氏名又は名称】 本田技研工業株式会社

【代理人】
【識別番号】 100077805
【弁理士】
【氏名又は名称】 佐藤 辰彦

【選任した代理人】
【識別番号】 100077665
【弁理士】
【氏名又は名称】 千葉 剛宏

【手数料の表示】
【予納台帳番号】 015174
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】
【物件名】 特許請求の範囲 1
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 9711295

【書類名】 特許請求の範囲**【請求項 1】**

3つ以上の接地部位を有する移動ロボット等の移動体の目標運動を発生する目標運動発生手段と、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段とを備え、前記移動体の運動を目標運動に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを操作可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差が0に近づくように前記第Cノードに属する前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを前記目標運動に対応して定まる目標相対高さから修正し、その修正された目標相対高さを満足するように前記関節を動作させるノード動作制御手段を備えたことを特徴とする移動体の制御装置。

【請求項 2】

各ノードに重みが設定されており、子ノードを持つ任意のノードである第Bノードに対し、該第Bノードのすべての子ノードの高さの、前記重みを用いた重み付き平均値を第Bノードの高さとして定義したとき、前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの高さが変化しないように第Cノードの子ノードの相互の相対高さを操作することによって前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを修正することを特徴とする請求項1記載の移動体の制御装置。

【請求項 3】

3つ以上の接地部位を有する移動ロボット等の移動体の目標運動と目標床反力とから構成される目標歩容を発生する目標歩容発生手段と、前記接地部位に作用する実床反力を検出または推定する床反力検出手段とを備え、前記移動体の歩容を目標歩容に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

任意のノードである第Aノードに対し、該第Aノードが前記葉ノードである場合には、該葉ノードである接地部位に作用する床反力を第Aノードのノード床反力と定義し、且つ、第Aノードが子ノードを持つ場合には、該第Aノードのすべての子ノードのノード床反力の合力を第Aノードのノード床反力と定義したとき、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを操作可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

前記第Cノードの各子ノードの実ノード床反力の間の相対関係に応じて、第Cノードに属する前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標相対高さから修正し、その修正された目標相対高さを満足するように前記関節を動作させるノード動作制御手段を備えたことを特徴とする移動体の制御装置。

【請求項 4】

各ノードに重みが設定されており、子ノードを持つ任意のノードである第Bノードに対し、該第Bノードのすべての子ノードの高さの、前記重みを用いた重み付き平均値を第Bノードの高さとして定義したとき、前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの高さが変化しないように第Cノードの子ノードの相互の相対高さを操作することによって前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを修正することを特徴とする請求項3記載の移動体の制御装置。

【請求項 5】

3つ以上の接地部位を有する移動ロボット等の移動体の目標運動と目標床反力とから構成される目標歩容を発生する目標歩容発生手段と、前記接地部位に作用する実床反力を検

出または推定する床反力検出手段とを備え、前記移動体の歩容を目標歩容に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

任意のノードである第Aノードに対し、該第Aノードが前記葉ノードである場合には、該葉ノードである接地部位に作用する床反力を第Aノードのノード床反力と定義し、且つ、第Aノードが子ノードを持つ場合には、該第Aノードのすべての子ノードのノード床反力の合力を第Aノードのノード床反力と定義し、さらに前記第Aノードのノード床反力のモーメントの、水平成分または床面平行成分または前記目標歩容上での想定床面平行成分が0となる床面上または想定床面上の点を第Aノードのノード床反力中心点と定義したとき、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを変更可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

任意のノードのノード床反力中心点の目標位置である目標ノード床反力中心点を少なくとも前記目標歩容に応じて決定する手段と、

前記第Cノードの実ノード床反力が第Cノードの目標ノード床反力中心点に作用するモーメント (M_{c_act}) とそのモーメントの目標値 (M_{c_dmd}) との差 ($M_{c_act} - M_{c_dmd}$) と、

該モーメント (M_{c_act}) から第Cノードの各子ノードの実ノード床反力が該子ノードの目標ノード床反力中心点に作用するモーメントを減じてなるモーメント (M_{cf}) とそのモーメントの目標値 (M_{c_dmd}) との差 ($M_{cf} - M_{c_dmd}$) と、

第Cノードの実ノード床反力のモーメントの前記水平成分または床面平行成分または想定床面平行成分が0となる前記床面上または想定床面上の点の位置と第Cノードの目標ノード床反力中心点の位置との差の値 (ΔP) と、

第Cノードの実ノード床反力のモーメントから第Cノードの各子ノードの実ノード床反力が該子ノードの目標ノード床反力中心点に作用するモーメントを減じてなるモーメントの前記水平成分または床面平行成分または想定床面平行成分が0となる前記床面上または想定床面上の点の位置と第Cノードの目標ノード床反力中心点の位置との差の値 (ΔPf) とのうちのいずれかを制御量として、該制御量に応じて、該制御量が0に近づくように前記第Cノードに属する前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標相対高さから修正し、その修正された目標相対高さを満足するように前記関節を動作させるノード動作制御手段とを備えたことを特徴とする移動体の制御装置。

【請求項6】

各ノードに重みが設定されており、子ノードを持つ任意のノードである第Bノードに対し、該第Bノードのすべての子ノードの高さの、前記重みを用いた重み付き平均値を第Bノードの高さとして定義したとき、前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの高さが変化しないように第Cノードの子ノードの相互の相対高さを操作することによって前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを変化させることを特徴とする請求項5記載の移動体の制御装置。

【請求項7】

少なくとも前記第Cノードの子ノードの目標ノード床反力中心点の位置の、前記重みを用いた重み付き平均値が第Cノードの目標ノード床反力中心点となるように、第Cノードおよびその子孫ノードのそれぞれの目標ノード床反力中心点と重みとが決定されることを特徴とする請求項6記載の移動体の制御装置。

【請求項8】

前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの各子ノードの目標ノード床反力中心点を第Cノードの目標ノード床反力中心点のまわりに回転させることにより前記第Cノードに属する前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを修正することを特徴とする請求項5記載の移動体の制御装置。

【請求項 9】

前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの各子ノードの目標ノード床反力中心点を第Cノードの目標ノード床反力中心点のまわりに回転させることにより第Cノードの子ノードの相互の相対高さを操作することを特徴とする請求項6又は7記載の移動体の制御装置。

【請求項 10】

任意の接地部位である第Dノードが非接地状態であるとき、第Dノード、または第Dノードの祖先ノードの重みが0に設定されることを特徴とする請求項6～8のいずれか1項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 11】

任意の接地部位である第Dノードが非接地状態であるとき、第Dノード、または第Dノードの祖先ノードの重みが0に設定されることを特徴とする請求項2または4記載の移動体の制御装置。

【請求項 12】

前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段を備え、

前記ノード動作制御手段は、少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき定められた前記各ノードの目標ノード床反力と、各ノードの前記目標ノード床反力中心点とのうちの少なくともいずれかを、前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を0に近づけるように修正する手段をさらに備えることを特徴とする請求項5～10のいずれか1項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 13】

前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段を備え、

前記ノード動作制御手段は、前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を0に近づけるように前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標相対高さから修正する手段をさらに備えることを特徴とする請求項3～10のいずれか1項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 14】

前記各目標ノード床反力中心点に作用する目標ノード床反力のモーメントが0になるように、前記接地部位のそれぞれの目標ノード床反力の並進力成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段を有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記移動体の基体から各接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたわみを打ち消すように前記第Cノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように前記関節を動作させることを特徴とする請求項5～10のいずれか1項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 15】

親ノードを有する任意のノードである第Eノードの目標ノード床反力の並進力成分を、第Eノードの親ノードの目標ノード床反力の並進力成分に第Eノードの前記重みを乗じた値になるように、第Eノードの目標ノード床反力の並進成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段を有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記移動体の基体から各接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたわみを打ち消すように前記第Cノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように関節を動作させることを特徴とする請求項3～10のいずれか1項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 16】

前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段と、

前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を 0 に近づけるように前記決定された目標ノード床反力中心点を修正し、その修正された目標ノード床反力中心点に作用する目標ノード床反力のモーメントが 0 になるように、各ノードの目標ノード床反力の並進力成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段とを有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記基体から前記接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたたわみを打ち消すように前記第 C ノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように関節を動作させることを特徴とする請求項 5 ～ 10 のいずれか 1 項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 17】

前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段と、

前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を 0 に近づけるように目標ノード床反力のモーメントを決定し、その決定された目標ノード床反力のモーメントが前記決定された目標ノード床反力中心点に作用するように、各ノードの目標ノード床反力の並進力成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段とを有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記基体から接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたたわみを打ち消すように前記第 C ノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように関節を動作させることを特徴とする請求項 5 ～ 10 のいずれか 1 項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 18】

前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段と、

前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を 0 に近づけるように前記重みを修正し、親ノードを有する任意のノードである第 E ノードの目標ノード床反力の並進力成分を、第 E ノードの親ノードの目標ノード床反力の並進力成分に第 E ノードの前記修正した重みを乗じた値になるように、第 E ノードの目標ノード床反力の並進成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段とを有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記基体から前記接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたたわみを打ち消すように前記第 C ノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように関節を動作させることを特徴とする請求項 4、6、7、9、10 のいずれか 1 項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 19】

前記ノード動作制御手段は、前記修正された目標相対高さを満足するように前記関節を動作させる際に、移動体の基体から第 C 中間ノードに属する前記 2 つ以上の接地部位までの間に存在する関節を動かすだけでは、該関節の自由度不足のために修正された目標相対高さを実現できない場合には、前記基体の目標姿勢も修正することを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 20】

前記ノード動作制御手段は、前記制御量に応じて前記関節を動作させる際に、移動体の基体から第 C 中間ノードに属する前記 2 つ以上の接地部位までの間に存在する関節を動か

すだけでは、該関節の自由度不足のために修正された目標相対高さを実現できない場合には、前記基体の目標姿勢も修正することを特徴とする請求項 5～9、11～18 のいずれか 1 項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 21】

前記ノード動作制御手段は、移動体の目標全床反力中心点と全体重心または前記基体の所定の代表点とを結ぶ線分の向きがほぼ変化しないように前記基体の目標姿勢を修正することを特徴とする請求項 19 または 20 記載の移動体の制御装置。

【請求項 22】

前記移動体は、少なくとも 2 つ以上の脚体を備えると共に、その各脚体の先端部と基体側の端部との間に膝関節を供えるロボットであり、前記接地部位には、各脚体の膝関節の部位が含まれることを特徴とする請求項 21 項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 23】

前記各脚体の膝関節の部位には、その部位の接地時に弾性変形する弾性体が設けられていることを特徴とする請求項 22 記載の移動体の制御装置。

【請求項 24】

前記移動体は、その基体に臀部を備えるロボットであり、前記接地部位には、該臀部が含まれることを特徴とする請求項 21 記載の移動体の制御装置。

【請求項 25】

前記臀部に、該臀部の接地時に弾性変形する弾性体が設けられていることを特徴とする請求項 24 記載の移動体の制御装置。

【請求項 26】

4 つ以上の子ノードを持つノードが設定されている場合に、前記接地部位のそれぞれに作用する床反力 F_n ($n=1, 2, \dots$) を基に、各ノードについて階層化したノード相対床反力 F_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$) を求め、さらに子ノードを持つ任意のノードである第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a_1, a_2, \dots, a_r$) のノード相対床反力を要素とするベクトル ($F_{a1_rel}, F_{a2_rel}, \dots, F_{ar_rel}$) を、第 n ノードのすべての子ノードの重みを要素とするベクトル ($W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{ar}$) にそれぞれ直交する所定の互いに独立な複数のベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$) の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張床反力モーメント M_{n_exp} と定義し、

また、前記接地部位のそれぞれの高さ Z_n ($n=1, 2, \dots$) を基に、各ノードについて階層化したノード相対高さ Z_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$) を求め、さらに前記第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a_1, a_2, \dots, a_r$) のノード相対高さを要素とするベクトル ($Z_{a1_rel}, Z_{a2_rel}, \dots, Z_{ar_rel}$) を、前記所定の互いに独立なベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$) の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張傾斜角 θ_n と定義したとき、

前記ノード動作制御手段は、前記第 n ノード拡張床反力モーメント M_{n_exp} および第 n ノード拡張傾斜角 θ_n を用いて前記第 C ノードの子ノードの相互の相対高さを操作することを特徴とする請求項 2、4、6、7、9、10 のいずれか 1 項に記載の移動体の制御装置。

【請求項 27】

移動ロボット等の移動体の目標運動と目標床反力とから構成される目標歩容を発生する目標歩容発生手段と、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段と、前記移動体の接地部位に作用する実床反力を検出または推定する床反力検出手段とを備え、前記移動体の歩容を目標歩容に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべての子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

任意のノードである第 A ノードに対し、該第 A ノードが前記葉ノードである場合には、該葉ノードである接地部位に作用する床反力を第 A ノードのノード床反力と定義し、且つ、第 A ノードが子ノードを持つ場合には、該第 A ノードのすべての子ノードのノード床反

力の合力を第Aノードのノード床反力と定義したとき、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを操作可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

前記移動体の目標歩容の運動および／または該移動体の実関節変位と、前記実姿勢傾き偏差と、前記第Cノードの各子ノードの実ノード床反力の間の相対関係とに応じて、少なくとも前記2つ以上の接地部位の接地面の高さの間の相対関係を推定する床形状推定手段を備えたことを特徴とする移動体の制御装置。

【請求項28】

前記移動体は3つ以上の接地部位を持つことを特徴とする請求項27記載の移動体の制御装置。

【請求項29】

移動ロボット等の移動体の目標運動を発生する目標運動発生手段と、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段とを備え、前記移動体の運動を目標運動に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記移動体の接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを操作可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

前記基体から前記接地部位までの間のリンク機構のたわみを検出または推定するたわみ検出手段と、

前記移動体の目標歩容の運動および／または該移動体の実関節変位と、前記実姿勢傾き偏差と、前記たわみとに応じて、少なくとも前記接地部位の接地面の高さの間の相対関係を推定する床形状推定手段を備えたことを特徴とする移動体の制御装置。

【請求項30】

前記移動体は3つ以上の接地部位を持つことを特徴とする請求項29記載の移動体の制御装置。

【請求項31】

前記各接地部位に作用する実床反力を検出または推定する床反力検出手段を備え、前記たわみ検出手段は、前記実床反力に基づき前記たわみを推定することを特徴とする請求項29または30記載の移動体の制御装置。

【請求項32】

各ノードに重みが設定されており、子ノードを持つ任意のノードである第Bノードに対し、該第Bノードのすべての子ノードの接地面の高さの、前記重みを用いた重み付き平均値を第Bノードの接地面の高さとして定義したとき、前記接地面高さ推定手段は、前記接地部位を含む前記第Cノードの各子孫ノードの接地面の高さの相対関係を推定することを特徴とする請求項27～31のいずれか1項に記載の移動体の制御装置。

【請求項33】

(階層型床形状推定＋目標運動修正動作)

前記推定された接地面の高さの間の相対関係に応じて、前記接地部位の位置を前記目標歩容の運動により定まる目標位置から修正する手段を備えたことを特徴とする請求項32記載の移動体の制御装置。

【請求項34】

前記床形状推定手段は、前記接地面の高さの間の相対関係を推定する子孫ノードの少なくとも1つが浮きそうな状態において、その浮きそうな子孫ノードがさらに浮く方向に前記接地面の高さの間の相対関係が推定されると判断したときには、少なくとも前記浮きそうな子孫ノードの推定を中断し、前記浮きそうな子孫ノードの接地面の高さの相対値を一定に維持して、前記相対関係を推定することを特徴とする請求項32または33記載の移動体の制御装置。

【請求項 35】

4つ以上の子ノードを持つノードが設定されている場合に、前記接地部位のそれぞれに作用する床反力 F_n ($n=1, 2, \dots$)を基に、各ノードについて階層化したノード相対床反力 F_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$)を求め、さらに子ノードを持つ任意のノードである第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a1, a2, \dots, ar$)のノード相対床反力を要素とするベクトル($F_{a1_rel}, F_{a2_rel}, \dots, F_{ar_rel}$)を、第 n ノードのすべての子ノードの重みを要素とするベクトル($W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{ar}$)にそれぞれ直交する所定の互いに独立な複数のベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張床反力モーメント M_{n_exp} と定義し、

また、前記接地部位のそれぞれの高さ Z_n ($n=1, 2, \dots$)を基に、各ノードについて階層化したノード相対高さ Z_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$)を求め、さらに前記第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a1, a2, \dots, ar$)のノード相対高さを要素とするベクトル($Z_{a1_rel}, Z_{a2_rel}, \dots, Z_{ar_rel}$)を、前記所定の互いに独立なベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張傾斜角 θ_n と定義したとき、

前記床形状推定手段は、前記第 n ノード拡張床反力モーメント M_{n_exp} および第 n ノード拡張傾斜角 θ_n を用いて前記第 C ノードの各子孫ノードの接地面の高さの相対関係を推定することを特徴とする請求項 27、28、および 31～34 のいずれか 1 項に記載に移動体の制御装置。

【請求項 36】

基体から延設された各脚体が該基体に近い方から股関節と膝関節とを有する多脚移動ロボットの制御装置において、

前記膝関節の部位に作用する外力たる膝荷重を検出または推定する膝荷重検出手段と、

前記膝荷重の目標値である目標膝荷重を決定する手段と、

前記検出または推定された膝荷重が前記目標膝荷重に近づくように、少なくとも前記股関節の変位を制御する手段とを備えたことを特徴とする移動ロボットの制御装置。

【請求項 37】

2つの脚体が延設された基体に臀部を有すると共に、その臀部の上方に基体の姿勢を変化させることができる基体関節を有する2脚移動ロボットにおいて、

前記臀部に作用する外力たる臀部荷重を検出または推定する臀部荷重検出手段と、

前記臀部荷重の目標値である目標臀部荷重を決定する手段と、

前記検出または推定された臀部荷重が目標臀部荷重に近づくように、少なくとも前記基体関節の変位を制御する手段とを備えたことを特徴とする移動ロボットの制御装置。

【書類名】 明細書

【発明の名称】 移動体の制御装置

【技術分野】

【0001】

この発明は脚式移動ロボットおよびアクティブサスペンションを持つ車輪型移動体の床反力制御、より具体的には脚式移動ロボットおよびアクティブサスペンションを持つ車輪型移動体が接地する床に未知の傾斜や凹凸がある場合にも、その影響を受けにくく適切に床反力を制御する装置に関する。さらに床形状を推定する装置に関する。

【背景技術】

【0002】

本願出願人による特開平5-305585号公報（特許文献1）には両脚のコンプライアンス制御技術が開示されている。この技術は、4脚等のロボットにも適用可能なものである。この場合、同公報の技術では、全脚を仮想平面上に接触させた状態で、仮想平面を傾ける動作となるので、床の大域的なうねりや傾斜には対応できる。しかし、同公報の技術では、局所的な傾斜や凹凸があると、荷重の配分が適切に行われなかった。その結果、接地すべき面が浮いてカタカタしたり、着地衝撃が大きく、接地性も悪かった。さらにその結果、滑りやスピンが発生し易かった。また、姿勢を復元させる床反力モーメントが適切に分配されるように制御できず、姿勢が揺れた。また一度振動し始めると、減衰し難かった。また、床反力の分配制御が適切に行なわれないために、一部のアクチュエータの負荷が過大になる場合があった。

【0003】

また、本願出願人による特開平10-277969号公報（特許文献2）、特開2001-322076号公報（特許文献3）には、複合コンプライアンス制御の技術、複合床形状推定の技術が開示されている。これらの技術では、2足歩行ロボットにおいて、床反力の適切な分配ができ、かつ、床形状を推定、具体的には各脚先端部の接地面傾斜や各接地面間の高低差を同時に、換言すれば複合的に、精度良く推定することができた。これらの技術は、本来、接地部位付きロボット用の技術である。従って、左前脚先端部と左後脚先端部を合わせて、左接地部位と見なせば、複合コンプライアンス制御は、4脚等にも対応できた。ただし、そのことが記述されていない。

【0004】

また、4脚ロボットの脚先端の触覚（荷重センサまたは接触センサ）を用いて着地時に床の高さを探る方式が知られている。しかし、この手法は、シーケンス的な手法であり、軟弱地盤のように床が着地後に変形するような場合には対応できなかった。特に、高速移動時等、ロボット本体が激しく振動しているときには、床高さが正しく推定できず、荷重の分配が適切に行われない恐れがあった。

【0005】

また、各脚のコンプライアンス制御を独立に行うものも知られている。しかし、この技術では、上体の揺れを通して脚同士の干渉が生じるにもかかわらず、このことが考慮されていない。すなわち、各脚のコンプライアンス制御が個別に行なわれる。このため、各脚のコンプライアンス制御が互いに協調し合うことがないので、適切に床反力が分配されなかった。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本発明はかかる背景に鑑みてなされたものであり、脚式移動ロボットや、アクティブサスペンションを持つ車輪型移動体が接地する床に未知の傾斜や凹凸がある場合にも、その影響を受けにくく適切に床反力を制御する装置を提供することを目的とする。さらに床形状を精度よく推定することができる装置を提供することを目的とする。

【特許文献1】 特開平5-305585号公報

【特許文献2】 特開平10-277969号公報

【特許文献3】特開 2001-322076 号公報
【課題を解決するための手段】

【0007】

前記目的を達成するために、本発明の移動体の制御装置の第1発明は、3つ以上の接地部位を有する移動ロボット等の移動体の目標運動を発生する目標運動発生手段と、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段とを備え、前記移動体の運動を目標運動に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを操作可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差が0に近づくように前記第Cノードに属する前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを前記目標運動に対応して定まる目標相対高さから修正し、その修正された目標相対高さを満足するように前記関節を動作させるノード動作制御手段を備えたことを特徴とする。

【0008】

そして、第2発明は、上記第1発明において、各ノードに重みが設定されており、子ノードを持つ任意のノードである第Bノードに対し、該第Bノードのすべての子ノードの高さの、前記重みを用いた重み付き平均値を第Bノードの高さとして定義したとき、前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの高さが変化しないように第Cノードの子ノードの相互の相対高さを操作することによって前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを修正することを特徴とする。

【0009】

また、第3発明の移動体の制御装置は、3つ以上の接地部位を有する移動ロボット等の移動体の目標運動と目標床反力とから構成される目標歩容を発生する目標歩容発生手段と、前記接地部位に作用する実床反力を検出または推定する床反力検出手段とを備え、前記移動体の歩容を目標歩容に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

任意のノードである第Aノードに対し、該第Aノードが前記葉ノードである場合には、該葉ノードである接地部位に作用する床反力を第Aノードのノード床反力と定義し、且つ、第Aノードが子ノードを持つ場合には、該第Aノードのすべての子ノードのノード床反力の合力を第Aノードのノード床反力と定義したとき、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを操作可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

前記第Cノードの各子ノードの実ノード床反力の間の相対関係に応じて、第Cノードに属する前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標相対高さから修正し、その修正された目標相対高さを満足するように前記関節を動作させるノード動作制御手段を備えたことを特徴とする。

【0010】

そして、第4発明は、上記第3発明において、各ノードに重みが設定されており、子ノードを持つ任意のノードである第Bノードに対し、該第Bノードのすべての子ノードの高さの、前記重みを用いた重み付き平均値を第Bノードの高さとして定義したとき、前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの高さが変化しないように第Cノードの子ノードの相互の相対高さを操作することによって前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを修正することを特徴とする。

【0011】

また、第5発明の移動体の制御装置は、3つ以上の接地部位を有する移動ロボット等の移動体の目標運動と目標床反力とから構成される目標歩容を発生する目標歩容発生手段と、前記接地部位に作用する実床反力を検出または推定する床反力検出手段とを備え、前記移動体の歩容を目標歩容に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

任意のノードである第Aノードに対し、該第Aノードが前記葉ノードである場合には、該葉ノードである接地部位に作用する床反力を第Aノードのノード床反力と定義し、且つ、第Aノードが子ノードを持つ場合には、該第Aノードのすべての子ノードのノード床反力の合力を第Aノードのノード床反力と定義し、さらに前記第Aノードのノード床反力のモーメントの、水平成分または床面平行成分または前記目標歩容上での想定床面平行成分が0となる床面上または想定床面上の点を第Aノードのノード床反力中心点と定義したとき、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを変更可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

任意のノードのノード床反力中心点の目標位置である目標ノード床反力中心点を少なくとも前記目標歩容に応じて決定する手段と、

前記第Cノードの実ノード床反力が第Cノードの目標ノード床反力中心点に作用するモーメント (Mc_{act}) とそのモーメントの目標値 (Mc_{dmd}) との差 ($Mc_{act} - Mc_{dmd}$) と、該モーメント (Mc_{act}) から第Cノードの各子ノードの実ノード床反力が該子ノードの目標ノード床反力中心点に作用するモーメントを減じてなるモーメント (Mcf) とそのモーメントの目標値 (Mc_{dmd}) との差 ($Mcf - Mc_{dmd}$) と、

第Cノードの実ノード床反力のモーメントの前記水平成分または床面平行成分または想定床面平行成分が0となる前記床面上または想定床面上の点の位置と第Cノードの目標ノード床反力中心点の位置との差の値 (ΔP) と、

第Cノードの実ノード床反力のモーメントから第Cノードの各子ノードの実ノード床反力が該子ノードの目標ノード床反力中心点に作用するモーメントを減じてなるモーメントの前記水平成分または床面平行成分または想定床面平行成分が0となる前記床面上または想定床面上の点の位置と第Cノードの目標ノード床反力中心点の位置との差の値 (ΔPf) とのうちのいずれかを制御量として、該制御量に応じて、該制御量が0に近づくように前記第Cノードに属する前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標相対高さから修正し、その修正された目標相対高さを満足するように前記関節を動作させるノード動作制御手段とを備えたことを特徴とする。

【0012】

そして、第6発明は、前記第5発明において、各ノードに重みが設定されており、子ノードを持つ任意のノードである第Bノードに対し、該第Bノードのすべての子ノードの高さの、前記重みを用いた重み付き平均値を第Bノードの高さとして定義したとき、前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの高さが変化しないように第Cノードの子ノードの相互の相対高さを操作することによって前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを変化させることを特徴とする。

【0013】

さらに、第7発明は、前記第6発明において、少なくとも前記第Cノードの子ノードの目標ノード床反力中心点の位置の、前記重みを用いた重み付き平均値が第Cノードの目標ノード床反力中心点となるように、第Cノードおよびその子孫ノードのそれぞれの目標ノード床反力中心点と重みとが決定されることを特徴とする。

【0014】

また、第8発明は、前記第5発明において、前記ノード動作制御手段は、前記第Cノード

ドの各子ノードの目標ノード床反力中心点を第Cノードの目標ノード床反力中心点のまわりに回転させることにより前記第Cノードに属する前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを修正することを特徴とする。

【0015】

また、第9発明は、第6または第7発明において、前記ノード動作制御手段は、前記第Cノードの各子ノードの目標ノード床反力中心点を第Cノードの目標ノード床反力中心点のまわりに回転させることにより第Cノードの子ノードの相互の相対高さを操作することを特徴とする。

【0016】

さらに、第10発明は、第6～第8発明において、任意の接地部位である第Dノードが非接地状態であるとき、第Dノード、または第Dノードの祖先ノードの重みが0に設定されることを特徴とする。

【0017】

また、第11発明は、前記第2または第4発明において、任意の接地部位である第Dノードが非接地状態であるとき、第Dノード、または第Dノードの祖先ノードの重みが0に設定されることを特徴とする。

【0018】

第12発明は、前記第5～第10発明において、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段を備え、

前記ノード動作制御手段は、少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき定められた前記各ノードの目標ノード床反力と、各ノードの前記目標ノード床反力中心点とのうちの少なくともいずれかを、前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を0に近づけるように修正する手段をさらに備えることを特徴とする。

【0019】

また、第13発明は、前記第3～第10発明において、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段を備え、

前記ノード動作制御手段は、前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を0に近づけるように前記2つ以上の接地部位の間の相対高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標相対高さから修正する手段をさらに備えることを特徴とする。

【0020】

さらに、第14発明は、第5～第10発明において、前記各目標ノード床反力中心点に作用する目標ノード床反力のモーメントが0になるように、前記接地部位のそれぞれの目標ノード床反力の並進力成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段を有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記移動体の基体から各接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたわみを打ち消すように前記第Cノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように前記関節を動作させることを特徴とする。

【0021】

第15発明は、第3～第10発明において、親ノードを有する任意のノードである第Eノードの目標ノード床反力の並進力成分を、第Eノードの親ノードの目標ノード床反力の並進力成分に第Eノードの前記重みを乗じた値になるように、第Eノードの目標ノード床反力の並進成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段を有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記移動体の基体から各接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたわみを打ち消すように前記第Cノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように関節を動作させることを特徴とする。

【0022】

そして、第16発明は、前記第5～第10発明において、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段と、

前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を0に近づけるように前記決定された目標ノード床反力中心点を修正し、その修正された目標ノード床反力中心点に作用する目標ノード床反力のモーメントが0になるように、各ノードの目標ノード床反力の並進力成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段とを有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記基体から前記接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたたわみを打ち消すように前記第Cノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように関節を動作させることを特徴とする。

【0023】

第17発明は、前記第5～第10発明において、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段と、

前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を0に近づけるように目標ノード床反力のモーメントを決定し、その決定された目標ノード床反力のモーメントが前記決定された目標ノード床反力中心点に作用するように、各ノードの目標ノード床反力の並進力成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段とを有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記基体から接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたたわみを打ち消すように前記第Cノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように関節を動作させることを特徴とする。

【0024】

また、第18発明は、第4、6、7、9、10発明において、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段と、

前記実姿勢傾き偏差に応じて、該実姿勢傾き偏差を0に近づけるように前記重みを修正し、親ノードを有する任意のノードである第Eノードの目標ノード床反力の並進力成分を、第Eノードの親ノードの目標ノード床反力の並進力成分に第Eノードの前記修正した重みを乗じた値になるように、第Eノードの目標ノード床反力の並進成分を少なくとも前記目標歩容の床反力に基づき決定する目標ノード床反力分配手段とを有し、

前記ノード動作制御手段は、前記各ノードの目標ノード床反力の並進力成分によって生じる前記基体から前記接地部位の接地面までの間のリンク機構のたわみを求め、その求めたたわみを打ち消すように前記第Cノードに属する接地部位の高さを前記目標歩容の運動に対応して定まる目標高さから修正し、修正された接地部位の目標高さを満足するように関節を動作させることを特徴とする。

【0025】

また、第19発明は、第1～第4発明において、前記ノード動作制御手段は、前記修正された目標相対高さを満足するように前記関節を動作させる際に、移動体の基体から第C中間ノードに属する前記2つ以上の接地部位までの間に存在する関節を動かすだけでは、該関節の自由度不足のために修正された目標相対高さを実現できない場合には、前記基体の目標姿勢も修正することを特徴とする。

【0026】

また、第20発明は、第5～9、第11～第18発明において、前記ノード動作制御手段は、前記制御量に応じて前記関節を動作させる際に、移動体の基体から第C中間ノードに属する前記2つ以上の接地部位までの間に存在する関節を動かすだけでは、該関節の自

由度不足のために修正された目標相対高さを実現できない場合には、前記基体の目標姿勢も修正することを特徴とする。

【0027】

さらに、第21発明は、第19または第20発明において、前記ノード動作制御手段は、移動体の目標全床反力中心点と全体重心または前記基体の所定の代表点とを結ぶ線分の向きがほぼ変化しないように前記基体の目標姿勢を修正することを特徴とする。

【0028】

さらに、第22発明では、第21発明において、前記移動体は、少なくとも2つ以上の脚体を備えると共に、その各脚体の先端部と基体側の端部との間に膝関節を供えるロボットであり、前記接地部位には、各脚体の膝関節の部位が含まれることを特徴とする。

【0029】

さらに、第23発明では、第22発明において、前記各脚体の膝関節の部位には、その部位の接地時に弾性変形する弾性体が設けられていることを特徴とする。

【0030】

また、第24発明は、前記第21発明において、前記移動体は、その基体に臀部を備えるロボットであり、前記接地部位には、該臀部が含まれることを特徴とする。

【0031】

さらに、第25発明は、第24発明において、前記臀部に、該臀部の接地時に弾性変形する弾性体が設けられていることを特徴とする。

【0032】

また、第26発明は、第2、4、6、7、9、10発明において、4つ以上の子ノードを持つノードが設定されている場合に、前記接地部位のそれぞれに作用する床反力 F_n ($n=1, 2, \dots$)を基に、各ノードについて階層化したノード相対床反力 F_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$)を求め、さらに子ノードを持つ任意のノードである第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a_1, a_2, \dots, a_r$)のノード相対床反力を要素とするベクトル($F_{a1_rel}, F_{a2_rel}, \dots, F_{ar_rel}$)を、第 n ノードのすべての子ノードの重みを要素とするベクトル($W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{ar}$)にそれぞれ直交する所定の互いに独立な複数のベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張床反力モーメント M_{n_exp} と定義し、

また、前記接地部位のそれぞれの高さ Z_n ($n=1, 2, \dots$)を基に、各ノードについて階層化したノード相対高さ Z_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$)を求め、さらに前記第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a_1, a_2, \dots, a_r$)のノード相対高さを要素とするベクトル($Z_{a1_rel}, Z_{a2_rel}, \dots, Z_{ar_rel}$)を、前記所定の互いに独立なベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張傾斜角 θ_n と定義したとき、

前記ノード動作制御手段は、前記第 n ノード拡張床反力モーメント M_{n_exp} および第 n ノード拡張傾斜角 θ_n を用いて前記第 C ノードの子ノードの相互の相対高さを操作することを特徴とする。

【0033】

また、本発明の移動体の制御装置の第27発明は、移動ロボット等の移動体の目標運動と目標床反力とから構成される目標歩容を発生する目標歩容発生手段と、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段と、前記移動体の接地部位に作用する実床反力を検出または推定する床反力検出手段とを備え、前記移動体の歩容を目標歩容に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

任意のノードである第 A ノードに対し、該第 A ノードが前記葉ノードである場合には、該葉ノードである接地部位に作用する床反力を第 A ノードのノード床反力と定義し、且つ、第 A ノードが子ノードを持つ場合には、該第 A ノードのすべての子ノードのノード床反

力の合力を第Aノードのノード床反力と定義したとき、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを操作可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

前記移動体の目標歩容の運動および／または該移動体の実関節変位と、前記実姿勢傾き偏差と、前記第Cノードの各子ノードの実ノード床反力の間の相対関係とに応じて、少なくとも前記2つ以上の接地部位の接地面の高さの間の相対関係を推定する床形状推定手段を備えたことを特徴とする。

【0034】

そして、第28発明は、第27発明において、前記移動体は3つ以上の接地部位を持つことを特徴とする。

【0035】

また、第29発明は、移動ロボット等の移動体の目標運動を発生する目標運動発生手段と、前記移動体の基体などの所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差を検出または推定する姿勢傾斜検出手段とを備え、前記移動体の運動を目標運動に追従させるように該移動体の動作制御を行う移動体の制御装置において、

前記移動体の接地部位のそれぞれが葉ノードとなり、且つ、該葉ノードと該葉ノードのすべてを子孫ノードとして持つ根ノードとの間に中間ノードが存在するように前記接地部位をツリー構造状に分類し、

前記中間ノードのうちの所定の第Cノードにその子孫ノードとして属する2つ以上の接地部位が互いの相対高さを操作可能に1つ以上の関節を介して接続されており、

前記基体から前記接地部位までの間のリンク機構のたわみを検出または推定するたわみ検出手段と、

前記移動体の目標歩容の運動および／または該移動体の実関節変位と、前記実姿勢傾き偏差と、前記たわみとに応じて、少なくとも前記接地部位の接地面の高さの間の相対関係を推定する床形状推定手段を備えたことを特徴とする。

【0036】

そして、第30発明は、第29発明において、前記移動体は3つ以上の接地部位を持つことを特徴とする。

【0037】

さらに、第31発明は、第29または第30発明において、前記各接地部位に作用する実床反力を検出または推定する床反力検出手段を備え、前記たわみ検出手段は、前記実床反力に基づき前記たわみを推定することを特徴とする。

【0038】

また、第32発明は、前記第27～第31発明において、各ノードに重みが設定されており、子ノードを持つ任意のノードである第Bノードに対し、該第Bノードのすべての子ノードの接地面の高さの、前記重みを用いた重み付き平均値を第Bノードの接地面の高さとして定義したとき、前記接地面高さ推定手段は、前記接地部位を含む前記第Cノードの各子孫ノードの接地面の高さの相対関係を推定することを特徴とする。

【0039】

そして、第33発明は、第32発明において、前記推定された接地面の高さの間の相対関係に応じて、前記接地部位の位置を前記目標歩容の運動により定まる目標位置から修正する手段を備えたことを特徴とする。

【0040】

さらに、第34発明は、第32または第33発明において、前記床形状推定手段は、前記接地面の高さの間の相対関係を推定する子孫ノードの少なくとも1つが浮きそうな状態において、その浮きそうな子孫ノードがさらに浮く方向に前記接地面の高さの間の相対関係が推定されると判断したときには、少なくとも前記浮きそうな子孫ノードの推定を中断し、前記浮きそうな子孫ノードの接地面の高さの相対値を一定に維持して、前記相対関係を推定することを特徴とする。

【0041】

また、第35発明は、第27、28、31～34発明において、4つ以上の子ノードを持つノードが設定されている場合に、前記接地部位のそれぞれに作用する床反力 F_n ($n=1, 2, \dots$)を基に、各ノードについて階層化したノード相対床反力 F_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$)を求め、さらに子ノードを持つ任意のノードである第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a_1, a_2, \dots, a_r$)のノード相対床反力を要素とするベクトル($F_{a1_rel}, F_{a2_rel}, \dots, F_{a_r_rel}$)を、第 n ノードのすべての子ノードの重みを要素とするベクトル($W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{a_r}$)にそれぞれ直交する所定の互いに独立な複数のベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張床反力モーメント M_{n_exp} と定義し、

また、前記接地部位のそれぞれの高さ Z_n ($n=1, 2, \dots$)を基に、各ノードについて階層化したノード相対高さ Z_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$)を求め、さらに前記第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a_1, a_2, \dots, a_r$)のノード相対高さを要素とするベクトル($Z_{a1_rel}, Z_{a2_rel}, \dots, Z_{a_r_rel}$)を、前記所定の互いに独立なベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張傾斜角 θ_n と定義したとき、前記床形状推定手段は、前記第 n ノード拡張床反力モーメント M_{n_exp} および第 n ノード拡張傾斜角 θ_n を用いて前記第 C ノードの各子孫ノードの接地面の高さの相対関係を推定することを特徴とする。

【0042】

また、本発明の移動ロボットの制御装置の第36発明は、基体から延設された各脚体が該基体に近い方から股関節と膝関節とを有する多脚移動ロボットの制御装置において、前記膝関節の部位に作用する外力たる膝荷重を検出または推定する膝荷重検出手段と、前記膝荷重の目標値である目標膝荷重を決定する手段と、前記検出または推定された膝荷重が前記目標膝荷重に近づくように、少なくとも前記股関節の変位を制御する手段とを備えたことを特徴とする。

【0043】

また、本発明の移動ロボットの制御装置の第37発明は、2つの脚体が延設された基体に臀部を有すると共に、その臀部の上方に基体の姿勢を変化させることができる基体関節を有する2脚移動ロボットにおいて、前記臀部に作用する外力たる臀部荷重を検出または推定する臀部荷重検出手段と、前記臀部荷重の目標値である目標臀部荷重を決定する手段と、前記検出または推定された臀部荷重が目標臀部荷重に近づくように、少なくとも前記基体関節の変位を制御する手段とを備えたことを特徴とする。

【0044】

なお、前記した前記第1～第37発明においては、「床反力」は、本来の意味での床（もしくは地面）からロボットに作用する反力だけを意味するものではなくでなく、ロボットが接触する床以外の対象物から受ける反力をも含むものとする。そして、接地部位は、床（もしくは地面）への接触箇所だけでなく、ロボットの対象物との接触箇所をも含むものとする。

【発明を実施するための最良の形態】

【0045】

まず、本発明の実施形態の説明で用いる主な用語について説明しておく。

【0046】

本出願人が先に提案した特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）においては、脚先端部から床反力を受けることを前提として、脚毎に床反力を分割した。これに対して、本明細書では、人間型ロボットがひざまづいた状況や腰掛けた状況など、脚先端部以外にも床反力を受ける状況までも考慮できるように、床と接しているロボットの部位を、「接地部位」と呼ぶこととする。

【0047】

接地部位を分類するに当たっては、同一リンク上で接地部位が複数箇所に分離されて分布している場合でも、すなわち同一リンク上で複数の接地面がつながっていても、こ

れらをまとめてひとつの接地部位と定義する。例えば、スパイクピンが4本装着された接地部位に作用する場合には、スパイクピン4本の接地面をまとめてひとつの接地部位とみなす。

【0048】

第n接地部位とは、このようなルールの基で分割され識別番号を割り振られた接地部位の識別名称である。

【0049】

第n接地部位床反力とは、第n接地部位に作用する床反力とする。

【0050】

また、全床反力とは、すべての接地部位に作用する床反力の合力とする。
更に、床反力中心点とは、作用する床反力のモーメント水平成分が0となる作用点とする。

【0051】

補足すると、第n接地部位床反力、全床反力などの床反力は、一般的に、作用点と、そこにかかる力と力のモーメントによって表現され、同一の床反力に対して、表現の組み合わせは無限通りある。その中には、鉛直軸まわりの成分を除くモーメント成分が0でかつ作用点が接地面上にある表記が存在する。この表現における作用点を、ここでは床反力中心点という。

【0052】

尚、この明細書で「床面」は、本出願人が先に提案した特開平5-318340号公報に記載される仮想的な床面であっても良い。

【0053】

本実施形態においては、少なくとも実床反力に応じて各接地部位の位置姿勢の修正を行なうコンプライアンス制御動作において、単に、互いに無関係に独立してコンプライアンス制御動作を行うのではない。本実施形態は、各接地部位をツリー構造で分類し、少なくとも分類された各グループに作用する実床反力に基づき、接地部位の修正動作を決定することに特徴がある。尚、以降、ツリー構造で分類することを「階層化」と呼ぶこともある。

【0054】

歩容生成装置が生成する変数の目標値には、変数名の頭に「目標」を付ける。実際のロボットの値（真の値はわからないので、実際には、検出値または推定値）には、変数名の頭に「実」を付ける。

【0055】

後述するコンプライアンス制御（床反力制御）の全床反力（ロボットのすべての接地部位に作用する床反力の合力）の目標を目標全床反力と呼ぶ。目標全床反力のモーメント水平成分が0となる床面上の点を目標全床反力中心点と呼ぶ。

【0056】

目標歩容の運動が発生する慣性力と重力の合力のモーメント水平成分が0となる床面上の点を目標ZMPと呼ぶ。目標全床反力は、通常、目標運動パターンに対して動力的に平衡する全床反力である。従って、通常、目標全床反力中心点は、目標ZMPに一致する。（ただし、例外的に、本出願人が先に提案した特許代3269852号などの大局安定化制御の場合には、一致するとは限らない。）そこで、以下の説明では、理解しやすくするために、目標ZMPという言葉を用いる場合もあるが、厳密には目標全床反力中心点と言うべき箇所が多い。

【0057】

尚、脚式移動ロボットの目標歩容が床反力以外の反力を環境から受けるように想定し、それを例えば、目標対象物反力と称し、先に述べた目標ZMPの定義を次のように拡張しても良い。即ち、目標運動パターンによって発生する慣性力と重力と目標対象物反力の合力を動力的に求め、床面上のある点に作用するモーメントが、鉛直軸まわりの成分を除いて零であるならば、その点を改めて目標ZMPとするようにしても良い。

【0058】

以下、本発明の実施形態を詳細に説明する。

【0059】

図1は、第1および第2の実施形態に係る一般的な多脚の移動ロボットの外観図である。ただし、第1の実施形態においては、第5および第6脚（#5および#6）はないものとする。

【0060】

図1の多脚ロボット1は、各脚#1～#4（第2の実施形態では#1～#6）の先端に、円盤状の接地部位を備え、接地部位の中心点（厳密には、脚先端の球関節（フリースポイント））には、床反力モーメントが作用しないようになっている。すなわち接地部位の中心点の床反力モーメントは0となる。

【0061】

図2（全体機能ブロック図）は、第1の実施形態に係る多脚ロボットの制御装置の構成および動作を機能的に示すブロック図である。

【0062】

歩容生成装置100は、図3a～図3cおよび図4a～図4c（4脚ロボット脚先端軌道と目標全床反力中心点軌道の図）に示すごとく、接地部位の軌道と目標全床反力中心点の軌道を決定する。図を用いて詳細に説明すると、図中の点Pは、目標全床反力中心点を表す。目標全床反力中心点と目標ZMPは同一点（すなわち点P）に決定される。球関節中心点の接地面への鉛直投影点あるいは球関節中心点を接地部位の代表点とする。以降、接地部位の代表点の位置を単に接地部位位置と呼ぶ。脚先端の球関節がフリースポイントであるので、接地部位代表点位置軌道（略して接地部位軌跡と呼ぶ。）は、後述する目標ノード床反力中心点 Q_n （ $n=1, 2, 3, 4$ ）の軌道に一致する。すなわち、各接地部位軌跡は、図の Q_n （ $n=1, 2, 3, 4$ ）の軌跡になるように決定される。

【0063】

図5（4脚ロボットの重みのタイムチャート）の最下段の図は、目標全床反力中心点（目標ZMP）の進行方向（X方向）成分のタイムチャートである。このように目標全床反力中心点（目標ZMP）は連続に設定される。

【0064】

また、歩容生成装置100は、上体位置姿勢軌道を決定する。上体位置姿勢軌道は、少なくとも、ロボットの運動によって発生する慣性力と重力の合力が目標ZMPまわりに作用するモーメントが0になるように決定される。

【0065】

尚、後述する第6の実施形態のように、腕や頭部の関節を備えるロボットにおける歩容生成装置は、腕や頭部の軌道も生成する。

[目標床反力分配器について]

本実施形態および以降の実施形態においては、図2の目標床反力分配器102は、接地部位をツリー状にグループ分けし（すなわち階層化し）、階層化された各グループに、ツリー構造のノードを対応させる。したがって、以下の説明において、ノードをグループに置き換えて表現しても構わない。

【0066】

第1の実施形態においては、図6（4脚ロボットの接地部位のツリー構造）のように接地部位が階層化される。すなわち、第 n 接地部位（ $n=1, 2, 3, 4$ ）を第 n ノードに対応させ、第1接地部位と第4接地部位を子ノードとして持つノードを第14ノードとし、第2接地部位と第3接地部位を子ノードとして持つノードを第23ノードとし、第14接地部位と第23接地部位を子ノードとして持つノードを第1423ノードとする。

【0067】

一般的な呼び方に従い、子ノードを持たないノードを葉ノードと呼び、親ノードを持たないノードを根ノードと呼ぶ。したがって、第 n ノード（ $n=1, 2, 3, 4$ ）は葉ノード、第1423ノードは根ノードである。

【0068】

階層構造は、あらかじめ決めておいても良いが、トロット、ギャロップなど、移動形態などに応じて、階層構造を変更しても良い。例えば、図23（4脚ツリー構造バリエーション図）のようにしても良い。このようにすることで、後述するコンプライアンス動作および床形状推定をよりの確に行なうことが可能となる場合があるからである。なお、説明を容易にするために、葉のノードには、1から順に間隔1で番号を割り付け、葉でないノードには、葉ノードより大きい番号を割り付けることとする。

【0069】

また、目標床反力分配器102は、図3bの位置関係を満足するように、各目標ノード床反力中心点 Q_n ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23$) および各重み W_n ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23$) を決定する。ただし、各重みは1以下の非負の値とする。

【0070】

この決定法を以下に詳説すると、第 n 接地部位 ($n=1, 2, 3, 4$) の目標床反力中心点は、本実施形態の4脚ロボットにおいては、常に接地部円盤の中心に設定される。目標ノード床反力中心点 Q_n ($n=1, 2, 3, 4$) は、目標第 n 接地部位床反力中心点に一致するように決定されるので、目標ノード床反力中心点 Q_n ($n=1, 2, 3, 4$) も常に接地部円盤の中心に設定させる。尚、脚先端の軌道は、連続に設定されるので、 Q_n ($n=1, 2, 3, 4$) も当然連続に設定される。

【0071】

また、 Q_{14} が、 $Q_1Q_{14}:Q_{14}Q_4 = W_4:W_1 = (1-W_1):W_{14}$ となる線分 Q_1Q_4 の内分点、 Q_{23} が、 $Q_2Q_{23}:Q_{23}Q_3 = W_3:W_2 = (1-W_2):W_{23}$ となる線分 Q_2Q_3 の内分点、 P が、 $Q_{14}P:PQ_{23} = W_{23}:W_{14} = (1-W_{14}):W_{14}$ となる線分 $Q_{14}Q_{23}$ の内分点となるように、各重みと各ノード床反力中心点が決定される。

【0072】

言い換えると、次式を満足するように、 Q_{14}, Q_{23}, W_n ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23$) が決定される。

$$Q_{14} = Q_1*W_1 + Q_4*W_4, \quad W_1 + W_4 = 1 \quad \cdots\text{式1}$$

$$Q_{23} = Q_2*W_2 + Q_3*W_3, \quad W_2 + W_3 = 1 \quad \cdots\text{式2}$$

$$P = Q_{14}*W_{14} + Q_{23}*W_{23}, \quad W_{14} + W_{23} = 1 \quad \cdots\text{式3}$$

W_n ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23$) が1以下の非負の値であることから、上式右辺における Q_n ($n=1, 2, 3, 4$) の係数 (重み) は、すべて非負の値となる。

【0073】

すなわち、上式は、子ノードを持つ任意のノード (すなわち葉ノードでない任意のノード) の床反力中心点が、所定の非負の重みを用いて、そのノードの子ノードの床反力中心点の重み付き平均に設定されることを意味する。言い換えると、図7（4脚ロボットのノード床反力中心点のツリー構造）に示す如く、子ノードを持つ任意のノードの床反力中心点は、すべての子ノードの床反力中心点の内分点に設定される。

【0074】

Q_{14}, Q_{23} は、図3a～図3cおよび図4a～図4cまでのように、脚先端の移動に伴って移動する。この時の、各重みは、図5a～図5c（4脚ロボットの重みのタイムチャート）のように連続的に変化するように決定される。 Q_n ($n=1, 2, 3, 4$) の軌道および各重みが連続に設定されるので、ノード床反力中心点 Q_{14}, Q_{23} も連続的に移動するように決定される。つまり、すべてのノード床反力中心点 (第 n ノード床反力中心点 ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23$)) は、連続に設定される。

【0075】

目標床反力分配器102は、さらに、目標各床反力、すなわち葉ノードである第 n ノード床反力 ($n=1, 2, 3, 4$) も決定して出力する。目標各床反力は、コンプライアンス機構42 (図1参照) のたわみ補償のために必要である。補足すると、コンプライアンス機構が

脚先端部以外にもある4脚ロボットにおいては、コンプライアンス機構の変形を求めるために、目標第14ノード床反力、目標第23床反力も決定して出力することが望ましい。

【0076】

一般的に、目標ノード床反力は、目標全床反力と各ノードの重みから決定される。具体的には、任意のノードの目標床反力は、そのノードの重みとそのノードのすべての先祖ノードの重みとの積に目標全床反力を乗じることによって得られる。すなわち、次式によって目標ノード床反力が算出される。

$$\text{目標第}n\text{ノード床反力} = \text{第}n\text{ノード重み} * \text{第}n\text{ノードのすべての先祖ノードの重みの積} * \text{目標全床反力} \quad \dots\text{式4}$$

言い換えると、葉ノードでない任意の第 n ノードの目標床反力が、第 n ノードのすべての子ノードの目標床反力の和（合力）に一致し、かつ、根ノード床反力が目標全床反力に一致するように、目標各ノード床反力が決定される。この関係を、図8（4脚ロボットのノード床反力のツリー構造）に示す。なお、図においては、目標第 n ノード床反力を F_n で表す。

【0077】

また、以上のごとく各ノードの目標床反力中心点と目標床反力を決定することは、目標第 n ノード床反力中心点まわりに第 n ノードのすべての子ノードの目標床反力の合力のモーメント水平成分が0となるように各ノードの目標床反力中心点と目標床反力を決定していることになる。

【0078】

なお、接地していない接地部位の目標床反力が0となるように、各目標ノード床反力中心点 Q_n ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23$)、各重み W_n ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23$) および目標各床反力を決定する。

【0079】

このように求めた目標各床反力は連続的に変化するので、衝撃の少ない移動（歩行）を実現するために適している。

【0080】

なお、目標各ノード床反力を決定する際に、上記のごとく重みを基に決定する代わりに、上記のように設定された目標各ノード床反力中心点を基に決定しても良い。すなわち、式1、式2、式3および式4を用いて、目標各ノード床反力中心点を基に目標各ノード床反力を決定するようにしても良い。

[姿勢安定化制御演算部について]

図2の姿勢安定化制御演算部104はセンサ情報に基づいてロボット1の状態を推定し、補償全床反力を算出する。

【0081】

ロボット1の姿勢を長期的に安定化させるためには、ロボットを望ましい位置姿勢に復元させるために必要な力とモーメントを求め、これを目標全床反力中心点（目標ZMP）を作用点として付加的に発生させる必要がある。この付加的な力とモーメントを補償全床反力という。また、補償全床反力のモーメント成分を「補償全床反力モーメント M_{dmd} 」（詳しくは目標全床反力中心点（目標ZMP）まわりの補償全床反力モーメント M_{dmd} ）と呼ぶ。ロボットのおおよそ前方向をX軸、おおよそ左横方向をY軸、上方向をZ軸とした、床に固定された所定の座標系を「支持脚座標系」と呼び、断らない限り、位置、力およびモーメントはこの座標系で表現されるものとする。また、 M_{dmd} のX成分を M_{dmdx} 、Y成分を M_{dmdy} 、Z成分を M_{dmdz} と記述する。姿勢センサ36によって得られる上体24の傾斜偏差（即ち、実上体傾斜－目標上体傾斜） θ_{berr} のX成分を θ_{berrx} 、Y成分を $\theta_{berr y}$ 、これらの時間微分値を $(d\theta_{berrx}/dt)$ 、 $(d\theta_{berr y}/dt)$ と記述する。

【0082】

M_{dmdx} および M_{dmdy} は、例えば次式の制御則によって決定される。

$$M_{dmdx} = -K_{thx} \theta_{berrx} - K_{wx} (d\theta_{berrx} / dt) \quad \dots\text{式5}$$

$$M_{dmdy} = -K_{thy} \theta_{berry} - K_{wy} (d\theta_{berry} / dt)$$

…式6

ここで、 K_{thx} 、 K_{thy} 、 K_{wx} および K_{wy} は、上体傾斜安定化制御ゲインである。

【0083】

本実施例においては、 M_{dmdz} を用いないので、 M_{dmdz} の決定を行なわないが、スピンを防止したりするために M_{dmdz} を決定するようにしても良い。 M_{dmdz} の決定法に関しては、本出願人が先に提案した特願2003-185613号や特願2003-185930号にて詳細に説明されている。

【0084】

後述する階層型コンプライアンス動作決定部114は、目標全床反力と補償全床反力の合力に実全床反力を一致させようと働く。

【0085】

各床反力検出器108は、6軸力センサによって各接地部位に作用する床反力の実際値である実接地部位床反力を検出する。さらに、各床反力検出器108は、関節のエンコーダによって検出される実変位（および／または変位指令）に基づき、上体24に固定された座標系に対する各接地部位の相対位置姿勢を算出し、それによって6軸力センサ34の検出値を座標変換し、上体に固定された座標系で表現された実各接地部位床反力を算出した後、これを支持脚座標系に変換する。なお、目標床反力中心点まわりに床反力を発生させることができる足平を持っていない、本実施形態のような通常のもつロボットの場合、3軸力センサあるいは、床反力の鉛直成分だけを検出する1軸力床反力センサを用いても良い。

[ロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）について]

図2に示すように、制御装置はロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）110を備え、ロボット幾何学モデル110は、各接地部位位置姿勢と上体位置姿勢などを基に、逆キネマティクスによって、それらを満足する各関節変位を算出する。本実施形態では、逆キネマティクスの解の式を直接的に求めておき、式に上体位置姿勢と各接地部位位置姿勢を代入するだけで各関節変位を得るようにした。即ち、ロボット幾何学モデル110は、目標上体位置姿勢と階層型コンプライアンス動作決定部で修正された修正目標各接地部位位置姿勢軌道（機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢軌道）を入力し、それらから脚の関節変位指令（値）を算出する。後述する第6の実施形態のように腕関節や首関節など脚関節以外の関節があるロボットの場合には、手や頭部などの上体に対する相対位置姿勢を基に、逆キネマティクスによって、脚関節以外の関節の変位が決定される。

[変位コントローラについて]

図2に示すように、制御装置は変位コントローラ112を備え、変位コントローラ112は、ロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）110で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の関節の変位を追従制御する。

[階層型コンプライアンス動作決定部について]

図2に示すように、制御装置は前記した階層型コンプライアンス動作決定部114を備え、階層型コンプライアンス動作決定部114は以下の2つの要求を満足させるように目標各接地部位位置姿勢軌道を修正する。

要求1) ロボットの位置姿勢制御のために、実全床反力を姿勢安定化制御演算部104が出力する補償全床反力（モーメント M_{dmd} ）と目標全床反力の合力に追従させる。ロボットの姿勢傾きだけを制御したい場合には、目標全床反力中心点まわりの実全床反力水平方向モーメント成分だけを補償全床反力モーメント M_{dmd} に追従させる。

要求2) 各接地部位の接地性を確保するように、すなわち各接地部位の実床反力の配分（分布）が適切な状態から極力ずれないように、できるかぎり目標各接地部位床反力中心点まわりの実各接地部位床反力モーメントの絶対値を小さくする。

【0086】

尚、通常は実全床反力を補償全床反力と目標全床反力の合力に一致させながら目標各接

地部位床反力中心点まわりの実各接地部位床反力モーメントを0にすることが、物理的に不可能な場合が多い。従って、要求1)と要求2)は完全に両立させることはできず、ある点で妥協しなくてはならない。

【0087】

上記を前提として図9（メインフローチャートの図）フロー・チャート（構造化フロー・チャート）を参照してこの装置の動作を説明する。尚、図9の左端には、該当する処理を行う図2の装置の構成要素を示す。

【0088】

先ずS10において装置を初期化し、S12を経てS14に進み、タイマ割り込みを待機する。タイマ割り込みは50msごとになされ、即ち、制御周期は50msである。

【0089】

続いてS16に進んで歩容の切り替わり目か否か判断し、否定されるときはS22に進むと共に、肯定されるときはS18に進んでタイマtをイニシャライズし、S20に進んで目標歩容パラメータを設定する。なお、多脚ロボットの1歩の歩容の期間は、例えば、ある所定の脚が離床してから次に離床するまでの期間とすれば良い。

【0090】

歩容パラメータは、ロボットの目標運動軌道を規定する運動パラメータと、目標床反力パターンを規定する床反力パラメータとから構成される。

【0091】

続いてS22に進み、上記歩容パラメータを基に、目標歩容の瞬時値を決定する。ここで「瞬時値」は制御周期ごとの値を意味し、目標歩容瞬時値は、目標上体位置姿勢、目標各接地部位位置姿勢、目標全床反力、および目標全床反力中心点位置（目標ZMP位置）から構成される。尚、ここで「姿勢」はX、Y、Z空間における「向き」を意味する。

【0092】

続いてS24に進んで、各ノードの重みと目標各接地部位床反力中心点を求める。これは目標床反力分配器102の説明で述べたように行う。

【0093】

続いてS26に進んで、目標各床反力（少なくとも、目標各接地部位床反力を含む）を求める。これも目標床反力分配器102の説明で述べたように行う。なお、前述の通り、接地部位以外にもコンプライアンス機構があるロボットの場合には、さらに葉ノードでないノードの目標床反力も求めた方が良い。

【0094】

続いてS28に進み、姿勢センサ36などの出力から上体24の傾斜（上体姿勢傾斜角偏差 θ_{berr} ）などロボット1の状態を検出する。

【0095】

続いてS30に進み、ロボット1の状態などから姿勢を安定化するための（目標全床反力中心点（目標ZMP）まわりの）補償全床反力モーメント M_{dmdx} 、 M_{dmdy} を求める。具体的には、前記した式5および式6に従って補償全床反力モーメント M_{dmdx} 、 M_{dmdy} を演算する。

【0096】

続いてS32に進んで実各接地部位床反力を検出する。これは前記の如く、6軸力センサ34によって検出する。前述の実各床反力検出器108は、6軸力センサ34と座標変換部から成り、先の説明に述べたように、検出された実各接地部位床反力は、支持脚座標系に変換される。

【0097】

続いてS34に進み、各種の補償角を決定する。これは、前記した階層型コンプライアンス動作決定部114が行う作業である。本実施の形態においては、補償角としては、第14ノード補償角 θ_{14} 、第23ノード補償角 θ_{23} 、第1423ノード補償角 θ_{1423} がある。

【0098】

階層型コンプライアンス動作決定部 114 によって、目標第 n ノード床反力中心点 Q_n ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23$) を修正した修正目標第 n ノード床反力中心点 Q_n' が決定される。第 14 ノード補償角 θ_{14} は、線分 Q_1Q_4 と線分 $Q_1'Q_4'$ とが成す角度である。第 23 ノード補償角 θ_{23} は、線分 Q_2Q_3 と線分 $Q_2'Q_3'$ とが成す角度である。第 1423 ノード補償角 θ_{1423} は、線分 $Q_{14}Q_{23}$ と線分 $Q_{14}'Q_{23}'$ とが成す角度である。これらを、図 10 (4 脚ロボットの下層コンプライアンス動作の図) および図 11 (4 脚ロボットの上層コンプライアンス動作の図) に示す。補償角についての詳細は後述する。

【0099】

階層型コンプライアンス動作決定部 114 の作業について説明する。説明の便宜のため、図 3b (4 脚ロボット脚先端軌跡と目標全床反力中心点軌跡の図) に示す状況を例にとって説明する。

【0100】

この状況における目標ノード床反力を、図 12 (4 脚ロボットの目標床反力の図) に示す。ここでベクトル F_{n_ref} は目標第 n ノード床反力の力成分を表す。また、 $F_{totalref}$ は目標全床反力の力成分を表す。

【0101】

目標ノード床反力中心点の定義より、目標ノード床反力のモーメント水平成分は、常に 0 に設定される。

【0102】

本実施形態のロボットにおいては、脚先端部にフリージョイント (球関節) があるために、接地部位床反力モーメント (水平成分および鉛直成分) を発生させることができない。故に、目標接地部位床反力のモーメント鉛直成分も 0 に設定される。

【0103】

葉ノードでないノードの目標ノード床反力モーメント鉛直成分は、目標運動に動力学的に釣り合うように決定すると、一般的には 0 ではない値も取り得るが、本実施例では、鉛直軸まわりの姿勢回転に関する制御を行なわないので、本実施例に関する図では、目標モーメント成分 (水平成分および鉛直成分) の表示を省略する。尚、鉛直軸まわりの姿勢回転に関する制御を行なう場合には、目標モーメント鉛直成分も設定すべきである。

【0104】

この状況における実各床反力の力成分を、図 13 (4 脚ロボットの实床反力の図) に示す。ここでベクトル F_{n_act} は実第 n ノード床反力の力成分を表す。また、この状況における実各床反力のモーメント成分を、図 14 (4 脚ロボットの实床反力モーメントの図) に示す。ここでベクトル M_{n_act} は実第 n ノード床反力のモーメント成分を表す。

【0105】

葉ノードでないノードの実床反力は、そのノードのすべての子ノードの床反力の合力とする。また、 $F_{totalact}$ は実全床反力の力成分を表す。

【0106】

本実施形態のロボットにおいては、脚先端部にフリージョイントがあるために、接地部位床反力モーメントを発生させることができない。故に、実接地部位床反力のモーメント成分は、常に 0 になる。よって、本実施形態に関する図では、実接地部位床反力モーメント成分の表示を省略する。

【0107】

葉ノードでないノードの実床反力モーメント成分 (本実施形態では、 M_{14act} , M_{23act}) は、一般的に、0 にならない。また、本実施形態のロボットにおいては、脚先端部にフリージョイントがあるために、 M_{14act} の線分 Q_1Q_4 方向成分、 M_{23act} の線分 Q_2Q_3 方向成分は 0 となる。図 13 (4 脚ロボットの实床反力の図) の点線は、目標ノード床反力を示す。

【0108】

尚、脚先端部の関節にアクチュエータを備えたロボットにおいては、鉛直軸まわりの姿勢回転に関する制御を行なわない場合でも、本出願人が先に提案した特開平 10-277969 号公報の実施例に示すごとく、目標各接地部位床反力モーメント水平成分も設定し

、また、実各接地部位床反力のモーメント成分も検出して、実各接地部位床反力モーメント成分を目標各接地部位床反力モーメント水平成分に近づけるように、（あるいは、実各接地部位床反力モーメント成分を目標各接地部位床反力モーメント水平成分とその接地部位補償床反力モーメントの和に近づけるように、）接地部位姿勢の補正動作を行うべきである。

【0109】

説明のため、上体姿勢が左後ろに倒れそうな状態となり、姿勢安定化制御演算部104が決定した補償全床反力モーメント $M_{dm d}$ が、図15（4脚ロボットの補償全床反力モーメントの図）のようになっている状況を想定する。

【0110】

姿勢を復元させるためには、目標全床反力中心点（目標ZMP）まわりの実全床反力モーメントの水平成分を、目標全床反力モーメント $M_{totalref}$ と補償全床反力モーメント $M_{dm d}$ の和の水平成分に追従させれば良い。

【0111】

一方、目標全床反力中心点（目標ZMP）では目標全床反力モーメント $M_{totalref}$ の水平方向成分は0である。従って、前後左右の姿勢傾きを復元させるためには、目標全床反力中心点（目標ZMP）まわりの実全床反力モーメントの水平成分を、 $M_{dm d}$ の水平成分に追従させれば良い。

【0112】

そこで、階層型コンプライアンス動作決定部114は、前記した以下の要求をできる限り満足するように接地部位の位置姿勢を修正する。

要求1) ロボットの姿勢傾斜を安定化制御するために、目標全床反力中心点（目標ZMP）まわりの実全床反力モーメントの水平方向（X、Y軸方向）成分を、補償全床反力モーメント $M_{dm d}$ の水平方向成分に追従させる。

要求2) 一部の接地部位に床反力が集中して、それ以外のある一部の接地部位の床反力が減少し過ぎて接地性が極端に低下しないように、できるかぎり葉でないノードの目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントの絶対値を小さくする。

要求3) 各接地部位におけるローカルな接地圧分布が偏って局所的な接地性が低下しないように、できるかぎり目標各接地床反力中心点（葉ノードの目標床反力中心点）まわりの実各接地部位床反力モーメントの絶対値を小さくする。

【0113】

但し、前述の通り、要求1)、要求2) および要求3) は、完全に両立させることはできず、ある点で妥協しなくてはならない。尚、本実施形態においては、脚先端にフリージョイントがあるために、目標各接地床反力中心点まわりの実床反力モーメントは常に0になるので、要求3) に関しては無視して良い。

【0114】

以下に前述の補償角について詳説する。

【0115】

目標第1ノード床反力中心点 $Q1$ と目標第4ノード床反力中心点 $Q4$ を含みかつ水平面と垂直な平面の法線ベクトル $V14$ を求める。 $V14$ の大きさは1とする。目標第1ノード床反力中心点 $Q1$ の座標を、目標第14ノード床反力中心点を回転中心として法線ベクトル $V14$ まわりに、ある回転角 $\theta 14$ だけ回転移動する。移動した後の点を $Q1'$ とする。同様に、目標第4接地部位床反力中心点 $Q4$ の座標を、目標第14ノード床反力中心点を回転中心として法線ベクトル $V14$ まわりに回転角 $\theta 14$ だけ回転移動する。移動した後の点を $Q4'$ とする。この回転角 $\theta 14$ を第14ノード補償角という。

【0116】

同様に、目標第2ノード床反力中心点 $Q2$ と目標第3ノード床反力中心点 $Q3$ を含みかつ水平面と垂直な平面の法線ベクトル $V23$ を求める。 $V23$ の大きさは1とする。目標第2ノード床反力中心点 $Q2$ の座標を、目標第23ノード床反力中心点を回転中心として法線ベクトル $V23$ まわりに、ある回転角 $\theta 23$ だけ回転移動する。移動した後の点を $Q2'$ とする。同様に

、目標第3接地部位床反力中心点Q3の座標を、目標第23ノード床反力中心点を回転中心として法線ベクトルV23まわりに回転角 θ_{23} だけ回転移動する。移動した後の点をQ3'とする。この回転角 θ_{23} を第23ノード補償角という。

【0117】

第14ノード補償角と第23ノード補償角を、図10（4脚ロボットの下層コンプラインス動作の図）に示す。

【0118】

次に、目標第14ノード床反力中心点Q14と目標第23ノード床反力中心点Q23を含みかつ水平面と垂直な平面の法線ベクトルV1423を求める。V1423の大きさは1とする。目標第14ノード床反力中心点Q14の座標を、目標全床反力中心点を回転中心として法線ベクトルV1423まわりに、ある回転角 θ_{1423} だけ回転移動する。移動した後の点をQ14'とする。同様に、目標第23接地部位床反力中心点Q23の座標を、目標全床反力中心点を回転中心として法線ベクトルV1423まわりに回転角 θ_{1423} だけ回転移動する。移動した後の点をQ23'とする。この回転角 θ_{1423} を第1423ノード補償角という。

【0119】

第1423ノード補償角を、図11（4脚ロボットの上層コンプラインス動作の図）に示す。

【0120】

始点がQ14、終点がQ14'のベクトルをベクトルQ14 Q14'とする。同様に、始点がQ23、終点がQ23'のベクトルをベクトルQ23 Q23'とする。

【0121】

次に、Q1'をベクトルQ14 Q14'だけ移動した点Q1''を求める。同様に、Q4'をベクトルQ14 Q14'だけ移動した点Q4''を求める。同様に、Q2'をベクトルQ23 Q23'だけ移動した点Q2''を求める。同様に、Q3'をベクトルQ23 Q23'だけ移動した点Q3''を求める。

【0122】

これらの点を、図11（4脚ロボットの上層コンプラインス動作の図）に示す。

【0123】

次いで、目標第n接地部位（ $n=1, 2, 3, 4$ ）を、姿勢は変えずにベクトルQnQn''だけ平行移動（ほぼ上下移動）させる。

【0124】

尚、脚先端にフリージョイントがないロボットにおいては、さらに、目標第n接地部位をQn''を中心に、前後方向軸（X軸）まわりに回転角 θ_{n_x} 、左右方向軸（Y軸）まわりに回転角 θ_{n_y} だけ回転させる。回転角 θ_n を第n接地部位補償角と呼び、回転角 θ_{n_x} を第n接地部位補償角X成分、回転角 θ_{n_y} を第n接地部位補償角Y成分と呼ぶ。第n接地部位補償角は、本出願人が先に提案した特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）に示す手法に従えば良い。

【0125】

以上のごとく、階層型のコンプライアンス動作が行なわれる。

【0126】

以上の補償角（補償動作量）が過大でなければ、接地圧力分布は変わっても、接地領域（接地面の圧力が正の領域）は変わらない。このような場合には、補償角に比例して各接地部位に装着されたコンプライアンス機構42が変形し、変形量に応じた実各接地部位床反力が発生する。この結果、補償角と補償角によって発生する実床反力の変化量との間の関係は、以下に示す良好な特性、すなわち線形特性を持つ。

特性1）葉ノードでないノードの目標床反力中心点まわりの補償角だけを操作して目標各接地部位位置を移動させると、下がった接地部位の実床反力の並進力成分が増加し、上がった接地部位の実床反力の並進力成分が減少する。このとき、（修正された）目標各接地部位床反力中心点まわりの実床反力モーメントは、ほとんど変化しない。

特性2）第n接地部位補償角だけを操作して目標第n接地部位姿勢を回転させると、目標第n接地部位床反力中心点に作用する実第n接地部位床反力のモーメント成分が変化し、並進

力成分はあまり変化しない。

特性 3) 葉ノードでないノードの目標床反力中心点まわりの補償角と第 n 接地部位補償角を同時に操作すると、実各接地部位床反力の変化量は、それぞれを単独に操作したときの変化量の和になる。

【0127】

図 17 (4 脚ロボット用階層型コンプライアンス動作決定部) は、本実施形態における階層型コンプライアンス動作決定部 114 の演算処理を示すブロック図であり、同図を参照してその処理を説明する。

[補償全床反力モーメント分配器について]

以下詳説すると、補償全床反力モーメント分配器 114a は、補償全床反力モーメント M_{dmd} を、第 1423 ノード補償床反力モーメント $M_{1423dmd}$ 、第 14 ノード補償床反力モーメント M_{14dmd} および第 23 ノード補償床反力モーメント M_{23dmd} に分配する。

【0128】

第 1423 ノード補償床反力モーメント $M_{1423dmd}$ は、第 1423 補償角 θ_{1423} を操作することによって発生すべき、目標第 1423 ノード床反力中心点 (すなわち目標全床反力中心点 (目標 ZMP)) まわりに各接地部位床反力の並進力成分が作るモーメントの目標値である。

【0129】

第 1423 ノード補償床反力モーメント $M_{1423dmd}$ の V_{1423} 方向まわりの成分を $M_{1423dmdv}$ と記述する。尚、ベクトル V_{1423} は階層型コンプライアンス動作決定部 114 の説明で定義したベクトルである。 V_{1423} に直交し、鉛直方向にも直交するベクトルを U_{1423} とすると、第 1423 ノード補償床反力モーメント $M_{1423dmd}$ の U_{1423} 方向成分 $M_{1423dmdu}$ は 0 に設定される。第 1423 ノード補償角 θ_{1423} を操作しても、床反力モーメントの U_{1423} 方向成分を発生することはできないからである。本実施の形態では鉛直軸まわりのロボット姿勢回転を制御しないので、 $M_{1423dmd}$ の鉛直方向成分 $M_{1423dmdz}$ も 0 に設定される。

【0130】

第 14 ノード補償床反力モーメント M_{14dmd} は、第 14 補償角 θ_{14} を操作することによって発生すべき、目標第 14 ノード床反力中心点まわりに各接地部位床反力の力成分が作るモーメントの目標値である。

【0131】

第 14 ノード補償床反力モーメント M_{14dmd} の V_{14} 方向まわりの成分を M_{14dmdv} と記述する。尚、ベクトル V_{14} は階層型コンプライアンス動作決定部 114 の説明で定義したベクトルである。 V_{14} に直交し、鉛直方向にも直交するベクトルを U_{14} とすると、第 14 ノード補償床反力モーメント M_{14dmd} の U_{14} 方向成分 M_{14dmdu} は 0 に設定される。第 14 ノード補償角 θ_{14} を操作しても、床反力モーメントの U_{14} 方向成分を発生することはできないからである。

【0132】

同様に、第 23 ノード補償床反力モーメント M_{23dmd} は、第 23 補償角 θ_{23} を操作することによって発生すべき、目標第 23 ノード床反力中心点まわりに各接地部位床反力の力成分が作るモーメントの目標値である。

【0133】

第 23 ノード補償床反力モーメント M_{23dmd} の V_{23} 方向まわりの成分を M_{23dmdv} と記述する。尚、ベクトル V_{23} は階層型コンプライアンス動作決定部 114 の説明で定義したベクトルである。 V_{23} に直交し、鉛直方向にも直交するベクトルを U_{23} とすると、第 23 ノード補償床反力モーメント M_{23dmd} の U_{23} 方向成分 M_{23dmdu} は 0 に設定される。第 23 ノード補償角 θ_{23} を操作しても、床反力モーメントの U_{23} 方向成分を発生することはできないからである。

【0134】

第 1423 ノード補償床反力モーメント $M_{1423dmd}$ 、第 14 ノード補償床反力モーメント M_{14dmd} および第 23 ノード補償床反力モーメント M_{23dmd} は、例えば次のように決定される

。

【0135】

任意の第 n ノードに対して、目標第 n ノード床反力中心点に第 n ノード補償床反力モーメントを加えることと等価になるように、第 n ノード補償床反力モーメントを0にしたまま、目標第 n ノード床反力中心点を修正した場合における修正された目標第 n ノード床反力中心点位置を、修正目標第 n ノード床反力中心点位置と呼ぶ。

【0136】

修正目標第1423ノード床反力中心点 $Pmdfd$ （修正目標全床反力中心点とも呼ぶ）、修正目標第14ノード床反力中心点 $Q14mdfd$ 、修正目標第23ノード床反力中心点 $Q23mdfd$ と補償床反力モーメントとの関係を次式に示す。ただし、「 $*$ 」は外積を意味する。

$$M1423dmd = (Pmdfd - P) * Ftotalref \quad \dots \text{式 7}$$

$$M14dmd = (Q14mdfd - Q14) * F14ref \quad \dots \text{式 8}$$

$$M23dmd = (Q23mdfd - Q23) * F23ref \quad \dots \text{式 9}$$

ロボットの接地性を高く保つためには、接地すべき接地部位の床反力が0に近づき過ぎたり、負の値になろうとするように制御すべきではない。したがって、以下の条件を満足すべきである。

修正ノード存在位置条件1)

$Pmdfd$ は、 P から線分 $Q14Q23$ の端点に近づき過ぎず、かつ、線分 $Q14Q23$ 上にあること。このように、修正目標第1423ノード床反力中心点（修正目標全床反力中心点） $Pmdfd$ が存在すべき範囲を、修正目標第1423ノード床反力中心点（修正目標全床反力中心点）存在許容範囲と呼ぶ。

修正ノード存在位置条件2)

$Q14mdfd$ は、 $Q14$ から線分 $Q1Q4$ の端点に近づき過ぎず、線分 $Q1Q423$ 上にあること。このように、修正目標第14ノード床反力中心点 $Q14mdfd$ が存在すべき範囲を、修正目標第14ノード床反力中心点存在許容範囲と呼ぶ。

修正ノード存在位置条件3)

$Q23mdfd$ は、 $Q23$ から線分 $Q2Q3$ の端点に近づき過ぎず、線分 $Q2Q323$ 上にあること。このように、修正目標第23ノード床反力中心点 $Q23mdfd$ が存在すべき範囲を、修正目標第23ノード床反力中心点存在許容範囲と呼ぶ。

【0137】

一方、ロボットに実際に発生する姿勢復元力を適切にするためには、第1423ノード補償床反力モーメント $M1423dmd$ 、第14ノード補償床反力モーメント $M14dmd$ および第23ノード補償床反力モーメント $M23dmd$ の合力が、補償全床反力モーメントに略一致すべきである。すなわち、以下の式を略満足すべきである。

$$Mdmd = M1423dmd + M14dmd + M23dmd \quad \dots \text{式 10}$$

そこで、第1423ノード補償床反力モーメント $M1423dmd$ 、第14ノード補償床反力モーメント $M14dmd$ および第23ノード補償床反力モーメント $M23dmd$ は、式7、式8、式9によって求められる修正目標各ノード床反力中心点位置が修正ノード存在位置条件1、2および3を満足している限りは、次式を満足するように決定される。

$$M1423dmd = Mat1423 \cdot Mdmd \cdot V1423 \quad \dots \text{式 11}$$

$$M14dmd = Mat14 \cdot Mdmd \cdot V14 \quad \dots \text{式 12}$$

$$M23dmd = Mat23 \cdot Mdmd \cdot V23 \quad \dots \text{式 13}$$

ただし、 $Mat1423$ 、 $Mat14$ 、 $Mat23$ はゲイン行列（第3要素が0である1行3列の行列）であり、これらは、式11、式12および式13によって求められる $M1423dmd$ 、 $M14dmd$ 、 $M23dmd$ が、式10を満足するように、設定される。

【0138】

より厳密には、式10、式11、式12および式13の連立方程式が $Mdmd$ の値にかかわらず恒等的に成立するように、ゲイン行列を決定する。恒等的に成立するためのゲイン行

列は一義的に決定されるわけではないので、例えば、修正ノード存在位置条件 1、2 および 3 のいずれを特に重視するかによって、それに適切なゲイン行列を決定すれば良い。補足すると、各補償角を連続的に変化させるために、ゲイン行列は連続的に変化させることが望ましい。また、直立時であるか否かや歩行の形態の違いなどによって、ゲイン行列の設定方針を変えても良い。

【0139】

式 11、式 12 および式 13 にしたがって決定される第 1423 ノード補償床反力モーメント $M_{1423dmd}$ 、第 14 ノード補償床反力モーメント M_{14dmd} および第 23 ノード補償床反力モーメント M_{23dmd} が修正ノード存在位置条件 1、2 および 3 のいずれかを満足していない場合には、満足するように、これらを修正する。より具体的には、前記存在許容範囲を越えた修正目標ノード床反力中心点を前記存在許容範囲の境界に設定し、その他の修正目標ノード床反力中心点を、式 11、式 12 および式 13 を可能な限り満足するように（左辺と右辺の差の絶対値がなるべく小さくなるように）決定する。ただし、一般的にフィードバック制御においてはフィードバック量が少々変わっても、挙動が大きく変わることはないので、式 11、式 12 および式 13 を厳密あるいは強引に満足させる必要はない。

【0140】

以上のごとく、補償全床反力モーメント分配器 114a は、各ノード補償床反力モーメントを決定する。決定される各ノード補償床反力モーメントの例を図 16 に示した。

【0141】

また、補償全床反力モーメント分配器 114a は、目標接地部位床反力、各補償床反力モーメント $M_{1423dmd}$ 、 M_{14dmd} 、 M_{23dmd} を基に、目標接地部位床反力に各補償床反力モーメントを付加することによって修正した修正目標接地部位床反力 $F_{n_refmdfd}$ ($n=1, 2, 3, 4$) を求める。

【0142】

この際、各目標接地部位床反力中心点 Q_n ($n=1, 2, 3, 4$)、目標全床反力中心点 P 、各目標ノード床反力中心点 Q_{14} 、 Q_{23} と全床反力 $F_{totalref}$ から、各目標ノード床反力を求める前述した手法と同様の手法で、各目標接地部位床反力中心点 Q_n ($n=1, 2, 3, 4$)、修正全床反力中心点 P_{mdfd} 、各修正目標ノード床反力中心点 Q_{14mdfd} 、 Q_{23mdfd} と全床反力から、修正目標接地部位床反力を求めても良い。尚、補償全床反力モーメント分配器のデータフローを図 18（補償全床反力モーメント分配器の図）に示す。

[ノード補償角決定部 114b の演算処理について]

次いで、図 17（4 脚ロボット用階層型コンプライアンス動作決定部）の第 1423 ノード補償角 θ_{1423} 決定部の処理を、図 19（ θ_{1423} 決定部の図）を参照して説明すると、目標第 14 ノード床反力中心点 Q_{14} に作用する実第 1 ノード床反力 F_{1act} と実第 4 ノード床反力 F_{4act} の並進力成分と目標第 23 ノード床反力中心点 Q_{23} に作用する実第 2 ノード床反力 F_{2act} と実第 3 ノード床反力 F_{3act} の合力の並進力成分とが、目標全床反力中心点 P のまわりに発生させるモーメント $M_{1423act}$ を、次式により求める。

$$M_{1423act} = PQ_{14} * (F_{1act} + F_{4act}) + PQ_{23} * (F_{2act} + F_{3act}) \quad \dots \text{式 14}$$

ここで、 PQ_{14} は始点が P 、終点が Q_{14} のベクトル、 PQ_{23} は始点が P 、終点が Q_{23} のベクトルである。

【0143】

また、式 14 の代わりに、次式を用いても実際上はほとんど問題がない。

【0144】

$$M_{1423act} = PQ_1 * F_{1act} + PQ_2 * F_{2act} + PQ_3 * F_{3act} + PQ_4 * F_{4act} \quad \dots \text{式 15}$$

式 15 は、目標全床反力中心点まわりに作用する実全床反力モーメント $M_{totalact}$ を算出する式になっている。尚、式 14 は、目標全床反力中心点まわりに作用する実全床反力モーメントから、目標第 14 ノード床反力中心点まわりに作用する実床反力モーメントと目標第 23 ノード床反力中心点まわりに作用する実床反力モーメントとを減じたものにな

っている。

【0145】

一般的に、葉ノードである任意の第 n ノードの実第 n ノード床反力モーメント Mn_act は、実第 n 接地部位床反力モーメントとする。また、葉ノードでない任意の第 n ノードに対し、そのすべての子ノードの床反力（ここでの子ノードの床反力は、厳密には、子ノードの目標床反力中心点に作用する子ノードの床反力）が目標第 n ノード床反力中心点に作用するモーメントを、実第 n ノード床反力モーメント Mn_act と呼ぶ。式14と式15のように、実第 n ノード床反力モーメントは、子ノードの実第 n ノード床反力モーメントを含む定義と含まない定義があるがいずれを用いても構わない。特に、子ノード床反力モーメントを制御するフィードバック制御の応答性が高ければ、子ノード床反力モーメントはただちに0に収束するので、いずれの定義を用いても、第 n ノード床反力の制御の挙動はあまり変わらない。

【0146】

式16は、式14に対応した実第 n ノード床反力モーメント算出一般式、式17は、式15に対応した実第 n ノード床反力モーメント算出一般式である。ただし、式16および式17において、 $QnQm$ は始点が Qn 、終点が Qm のベクトルである。

【0147】

また、葉ノードである第 m ノードの実床反力モーメント Mm_act は、接地部位床反力検出器が検出した床反力モーメントとする。

【0148】

$m \in$ 第 n ノードの子ノードの番号の集合

$$Mn_act = \sum (QnQm * Fm_act) \quad \dots \text{式 16}$$

$m \in$ 第 n ノードの子孫である葉ノードの番号の集合

$$Mn_act = \sum (QnQm * Fm_act + Mm_act) \quad \dots \text{式 17}$$

次に、 $M1423act$ のベクトル $V1423$ 方向成分 $M1423actv$ を抽出する。これは、ベクトルの内積演算「 \cdot 」を用いた次式によって得られる。

$$M1423actv = M1423act \cdot V1423 \quad \dots \text{式 18}$$

次に、 $M1423actv$ をローパスフィルタ114iに通し、 $M1423actvfilt$ を得る。また、第1423ノード補償床反力モーメント $V1423$ 方向成分 $M1423dmdv$ を補償フィルタ114jに通し、それを、 $M1423actvfilt$ から減じ、偏差モーメント $V1423$ 方向成分 $M1423errv$ を得る。

【0149】

尚、補償フィルタ114jは、制御系における $M1423dmdv$ から実全床反力モーメントまでの伝達関数の周波数応答特性を改善するものである。

【0150】

最後に次式によって第1423ノード補償角 $\theta 1423$ を得る。ここで $K1423$ は制御ゲインであり、通常、これは正の値に設定する。

$$\theta 1423 = K1423 * M1423errv \quad \dots \text{式 19}$$

すなわち、偏差モーメント $V1423$ 方向成分 $M1423errv$ に制御ゲイン $K1423$ を乗じることにより、第1423ノード補償角 $\theta 1423$ を得る。

【0151】

次いで、図17（4脚ロボット階層型コンプライアンス動作決定部の図）の第14ノード補償角 $\theta 14$ 決定部114cの処理を、図20（ $\theta 14$ 決定部の図）を参照して説明すると、目標第1ノード床反力中心点 $Q1$ に作用する床反力並進成分 $F1act$ と目標第4ノード床反力中心点 $Q4$ に作用する床反力並進成分 $F4act$ とが、目標第14ノード床反力中心点 $Q14$ のまわりに発生するモーメント $M14act$ を、一般式である式16を用いて求める。より具体的には、次式により求める。

$$M14act = Q14Q1 * F1act + Q14Q4 * F4act \quad \dots \text{式 20}$$

ここで、 $Q14Q1$ は始点が $Q14$ 、終点が $Q1$ のベクトル、 $Q14Q4$ は始点が $Q14$ 、終点が $Q4$ のベクトルである。

【0152】

また、式20の代わりに、次式（式17を具体化した式）を用いても、前述に理由により、実際上はほとんど問題がない。

$$M14act = Q14Q1 \cdot F1act + Q14Q4 \cdot F4act + M1act + M4act \quad \cdots \text{式 2 1}$$

ただし、 $M1act$ は、実第1ノード床反力モーメント、 $M4act$ は、実第4ノード床反力モーメントである。

【0153】

式21は、目標第14ノード床反力中心点まわりに作用する、第14ノードのすべての葉ノードの実床反力モーメントの合力のモーメントを算出する式になっている。尚、式20は、目標第14床反力中心点まわりに作用する、第14ノードのすべての葉ノードの実床反力モーメントの合力のモーメントから、実第1ノード床反力モーメントと実第4ノード床反力モーメントとを減じたものになっている。

【0154】

次に、 $M14act$ のベクトル $V14$ 方向成分 $M14actv$ を抽出する。これは、ベクトルの内積演算を用いた次式によって得られる。

$$M14actv = M14act \cdot V14 \quad \cdots \text{式 2 2}$$

次に、 $M14actv$ をローパスフィルタ114i'に通し、 $M14actvfilt$ を得る。また、第14ノード補償床反力モーメント $V14$ 方向成分 $M14dmdv$ を補償フィルタ114j'に通し、それを、 $M14actvfilt$ から減じ、偏差モーメント $V14$ 方向成分 $M14errv$ を得る。尚、補償フィルタ114j'は、制御系における $M14dmdv$ から実全床反力モーメントまでの伝達関数の周波数応答特性を改善するものである。

【0155】

最後に次式によって第14ノード補償角 $\theta 14$ を得る。ここで $K14$ は制御ゲインであり、通常、これは正の値に設定する。

$$\theta 14 = K14 \cdot M14errv \quad \cdots \text{式 2 3}$$

図17（4脚ロボット階層型コンプライアンス動作決定部）の第23ノード補償角 $\theta 23$ 決定部の処理は、第14ノード補償角 $\theta 14$ 決定部114cの処理と同様であるので、ここでは説明を省略する。

【0156】

図17（4脚用階層型コンプライアンス動作決定部の図）の説明を続けると、修正目標接地部位位置姿勢算出部114gは、第1423ノード補償角 $\theta 1423$ 、第14ノード補償角 $\theta 14$ 、第23ノード補償角 $\theta 23$ に基づき、前述の階層型コンプライアンス動作の接地部位位置姿勢修正手法に従って目標接地部位位置姿勢を修正し、修正目標接地部位位置姿勢を得る。尚、本実施の形態においては、接地部位（脚先端）にフリージョイントがあり、意図的にその姿勢を変化させることはできないので、修正目標接地部位位置姿勢のうちの姿勢は修正しない。あるいは、目標歩容として接地部位姿勢を決定（出力）する必要がない。

[機構変形補償量算出部について]

図21（機構変形補償量算出部の図）に示すように、機構変形補償量算出部114nは、修正目標接地部位床反力 $Fn_refmdfd$ ($n=1, 2, 3, 4$)（目標接地部位床反力に、第1423ノード補償床反力モーメント $M1423dmd$ 、第14ノード補償床反力モーメント $M14dmd$ および第23ノード補償床反力モーメント $M23dmd$ を付加することによって修正された目標接地部位床反力）によって発生が予想されるコンプライアンス機構42の変形量を、コンプライアンス機構に作用する力（あるいは床反力）と変形の関係を表す機構コンプライアンスモデルを用いて求め、さらにこれを打ち消すための機構変形補償量を求める。機構変形補償量は、変形量に (-1) を乗じることにより求められる。

【0157】

機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部114hは、算出された機構変形量を打ち消すように、修正目標接地部位位置姿勢をさらに修正し、(すなわち、修正目標接地部位位置姿勢に機構変形補償量を付加することにより、) 機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を得る。

【0158】

例えば、修正目標接地部位床反力によって、ある接地部位近傍のコンプライアンス機構42が鉛直方向にzだけ縮むと算出された場合には、その接地部位の目標位置をzだけ下げる。即ち、機構変形補償後の接地部位の接地面が目標接地部位床反力を受けて変形したときの位置姿勢が、機構変形補償前の接地部位の接地面の目標位置姿勢に一致するように、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を算出する。なお、これについての詳しい説明は、特開平10-277969号公報に詳細に説明されている。

【0159】

機構変形補償は、コンプライアンス機構42の変形によって生じる実接地部位位置姿勢のずれをフィードフォワード的に打ち消す制御であり、この制御がない場合に比較し、より一層、目標歩容に近い歩行を実現することができる。

[補償角決定サブルーチンフローチャートについて]

上記を前提として図9(メインフローチャートの図)のフロー・チャートの説明に戻ると、前記の如く、S34において上記した補償角を決定する。図22(各補償角決定サブルーチン)は、その作業を一般化したサブルーチン・フロー・チャートである。

【0160】

同図を参照して説明すると、先ずS100において、実各接地部位床反力を基に、実第nノード床反力 F_{n_act} ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23, 1423$)を算出する。次いでS102に進み、第nノード床反力モーメント M_{n_act} ($n=1, 2, 3, 4, 14, 23, 1423$)を算出する。次いでS104に進み、補償全床反力モーメントを基に、第nノード補償床反力モーメント M_{n_dmd} ($n=14, 23, 1423$)を決定する。次いでS106に進み、階層型コンプライアンス動作で定義したようにベクトル V_{1423}, V_{14}, V_{23} およびこれに直交したベクトル U_{1423}, U_{14}, U_{23} を求める。(本実施例と異なり、第nノードの子ノードの数が3以上の場合には、 V_n は、時間的に急激に変化しなければ、どの向きにとっても良いので、支持脚座標系X座標や上体の向きに合わせるなど、適当に決定すれば良い。)次いでS108に進み、実第nノード床反力モーメント($n=14, 23, 1423$)の V_n 方向成分 M_{n_actv} と U_n 方向成分 M_{n_actu} を抽出する。本実施例のように任意の第nノードの子ノードの数が2以下の場合には、 U_n 方向成分 M_{n_actu} は0である。

【0161】

次いでS110に進み、第nノード補償床反力モーメント M_{n_dmd} ($n=14, 23, 1423$)の V_n 方向成分 M_{n_dmdv} と U_n 方向成分 M_{n_dmdu} を抽出する。本実施例のように任意の第nノードの子ノードの数が2以下の場合には、第nノード補償角U成分は0にする。次いでS112に進み、 M_{n_actv} をフィルタに通した値と M_{n_dmdv} をフィルタに通した値の差にゲイン K_n を乗じることにより第nノード補償角V成分を決定する。次いでS114に進み、 M_{n_actu} をフィルタに通した値と M_{n_dmdu} をフィルタに通した値の差にゲイン K_n を乗じることにより第nノード補償角U成分を決定する。ただし、本実施例のように任意の第nノードの子ノードの数が2以下の場合には、第nノード補償角U成分は0にする。

【0162】

次いで図9(メインフローチャートの図)のフロー・チャートのS36に進み、目標各接地部位床反力に基づいて機構変形補償量を算出する。

【0163】

次いでS38に進んで目標接地部位位置姿勢を各補償角 $\theta_{1423}, \theta_{14}, \theta_{23}$ に応じて修正し、さらにこれを機構変形補償量に応じて修正し、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を得る。

【0164】

次いで S 4 0 に進み、上体位置姿勢と機構変形補償入り修正接地部位位置姿勢から関節変位指令 (値) を算出し、S 4 2 に進んで実関節変位を算出された関節変位指令 (値) に追従させるようサーボ制御し、S 4 4 に進んで時刻を Δt 更新し、S 1 4 に戻って上記の処理を繰り返す。

[階層型コンプライアンス制御の効果について]

上記の如く構成したので、これによって、概括すれば、接地部位が 3 つ以上ある脚式移動ロボットにおいても、各ノード床反力の制御が互いに殆ど干渉しないようになり、それらを容易かつ適切に制御することができる。したがって、制御の干渉がなく、実各ノード床反力が望ましい値からずれたり発振することがない。従って、大域的なうねりや傾斜だけでなく、局所的な凹凸や傾斜なども含む予期しない床形状変化があっても、その影響をあまり受けずに脚式移動ロボットに作用する床反力を適切に制御することができる。また、脚式移動ロボットの姿勢安定化制御を容易に実現できると共に、脚式移動ロボットが受ける着地衝撃を低減することができ、脚式移動ロボットの接地性を高め、歩行時のスリップやスピンを防止することができる。さらに、脚式移動ロボットのアクチュエータの負荷を低減することができる。したがって、適切に各接地部位の床反力を制御し、高い姿勢安定性を得ることができる。

【0165】

姿勢安定化に対する効果を補足すると、ロボットが想定した床面上を想定した通りに歩行している状態から、ロボット全体が傾いた場合に、傾き角偏差 θ_{berr} とこれに応じて発生する目標全床反力中心点まわりのモーメント増加量 ΔM の関係が、比例関係にあることが望ましい。そうでなくても、ある回転行列 T 、ある対角行列 $\text{diag}(a, b)$ に対し、次式が成立することが望ましい。

$$T \Delta M = \text{diag}(a, b) \cdot T \theta_{berr}$$

…式 2 4

これらの関係を満足しない場合には、姿勢が傾いた状態から戻る時に、直線的に傾き角偏差が 0 に収束せず、味噌振り運動を起こすおそれがある。例えば、前に傾いた状態では、後ろに戻す復元力以外に、横方向への転倒力 (復元力) が余計に作用し、傾き角偏差が直線的に 0 に戻らずに、後ろ横方向に復元力が働いて、傾き角偏差 0 を中心に渦巻き状に傾き角偏差 0 に収束していく。

【0166】

また、上記と同じ理由から、コンプライアンス制御は、ロボット全体の傾き角偏差速度 $d\theta_{err}/dt$ とこれに応じて発生するモーメント増加量 ΔM_d の関係も、比例関係にあることが望ましい。そうでなくても、ある回転行列を T 、ある対角行列 $\text{diag}(e, f)$ に対し、次式が成立することが望ましい。

$$T \Delta M_d = \text{diag}(e, f) \cdot T \cdot d\theta_{err}/dt$$

…式 2 5

一般的に、各脚に独立にコンプライアンス制御を掛けると、これらの関係を満たさず、味噌振り運動を起こすおそれがある。本実施例に示した階層型コンプライアンス制御においては、これらの関係を満足するので、姿勢制御の収束性が高く、また、発振や振動を防止することができる。

[補正動作を鉛直方向にした場合の変形例について]

本実施形態においては、目標接地部位を、姿勢を変えずに、各ノード床反力中心点まわりに回転移動させるように補正動作を行ったが、目標接地部位を鉛直方向にだけ移動させるようにしても良い。具体的には、以下の手順によって求める。

【0167】

まず、以下の式により、目標第 1 4 ノード床反力中心点の鉛直位置修正量 $Z14$ と第 2 3 ノードの床反力中心点の鉛直位置修正量 $Z23$ を求める。

$$Z14 = - \text{線分PQ14 の長さ} \cdot \theta_{1423} \quad \dots \text{式 2 6}$$

$$Z23 = \text{線分PQ23 の長さ} \cdot \theta_{1423} \quad \dots \text{式 2 7}$$

但し、ここで、 θ_{1423} には式 1 9 で求められる値を代入する。

【0168】

次いで、目標接地部位床反力中心点の鉛直位置修正量 Z_n ($n=1, 2, 3, 4$)を次式により求める。

$$Z_1 = - \text{線分} Q_{14}Q_1 \text{ の長さ} * \theta_{14} + Z_{14} \quad \dots \text{式 28}$$

$$Z_4 = \text{線分} Q_{14}Q_4 \text{ の長さ} * \theta_{14} + Z_{14} \quad \dots \text{式 29}$$

$$Z_2 = - \text{線分} Q_{23}Q_2 \text{ の長さ} * \theta_{23} + Z_{23} \quad \dots \text{式 30}$$

$$Z_3 = \text{線分} Q_{23}Q_3 \text{ の長さ} * \theta_{23} + Z_{23} \quad \dots \text{式 31}$$

但し、ここで、 θ_{14} には、式 23 で求められる値を代入し、 θ_{23} には、 θ_{14} と同様にして求められる値を代入する。

【0169】

以上のように求めた Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 を目標接地部位位置に鉛直方向に加えることにより、修正目標接地部位位置を得る。

[第2の実施形態(6脚ロボットのコンプライアンス制御)について]

以下に図を中心に用いて第2の実施形態である6脚ロボットのコンプライアンス制御の説明をする。第1の実施形態である4脚ロボットのコンプライアンス制御とほとんど相違はなく、第1の実施形態である4脚ロボットのコンプライアンス制御と第2の実施形態である6脚ロボットのコンプライアンス制御との違いは、3つの子ノードを持つノードがあることと、それに対応して処理が拡張されていることである。

【0170】

図24は、第1の実施形態の4脚ロボットの基本階層構造の図(例えば、図3a)に対応するものであり、本実施形態の6脚ロボットの基本階層構造を示す図である。図25は、第1の実施形態の図17に対応するものであり、本実施形態での4脚ロボット用階層型コンプライアンス動作決定部を示す図である。図26は第1実施形態の図16に対応するものであり、本実施形態の6脚ロボットでの補償全床反力モーメントの分配手法を示す図である。

【0171】

図27は第1の実施形態の図19に対応するものであり、本実施形態の6脚ロボットでの θ_{145236} 決定部(図25参照)における補償角 θ_{145236} の V_{145236} 成分決定の処理を示すブロック図である。尚、本実施形態では、 V_{145236} 成分を決定する際は、 U 成分も同様に求められる。また、図28は第1の実施形態の図20に対応するものであり、本実施形態の6脚ロボットでの θ_{145} 決定部(図25参照)における補償角 θ_{145} の V_{145} 成分決定の処理を示すブロック図である。補足すると、補償角 θ_{236} も θ_{145} と同様に決定される。

【0172】

図29は第1の実施形態の図12に対応するものであり、本実施形態の6脚ロボットの目標床反力を示す図である。図30は第1の実施形態の図13に対応するものであり、本実施形態の6脚ロボットの実床反力を示す図である。図31は第1の実施形態の図14に対応するものであり、本実施形態の6脚ロボットの実床反力モーメントを示す図である。この実床反力モーメントの算出には、一般式である前記式16または式17が用いられる。

【0173】

更に、図32は第1の実施形態の図15に対応するものであり、本実施形態の6脚ロボットの補償床反力モーメントを示す図である。また、図33および図34は、それぞれ第1の実施形態の図10、図11に対応するものであり、それぞれ、本実施形態の6脚ロボットの下層コンプライアンス動作、上層コンプライアンス動作を示す図である。

【0174】

階層構造は、あらかじめ決めておいても良いが、4脚ロボットと同様、動作形態(移動形態)などに応じて階層構造を変更しても良い。例えば、図35(6脚ツリー構造バリエーション図)のようにしても良い。このようにすることで、コンプライアンス動作および床形状推定をよりの確に行なうことが可能となる場合があるからである。

【0175】

尚、接地部位として足平があり、足平の目標床反力中心点（目標接地部位床反力中心点）まわりに床反力モーメントを発生させることができるロボットでは、足平に対応した目標接地部位床反力中心点（目標ノード床反力中心点）まわりの足平姿勢回転動作を、特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）に示した手法で行なえば良い。

〔第3実施形態（床形状推定）について〕

次いで、第2の実施形態のロボットに床形状推定機能とその推定結果に応じた動作補正機能を加えた第3の実施形態について説明する。なお、本実施形態では、主に、6脚ロボットを中心として説明するが、4脚ロボットについても補足的に説明を付加する場合がある。

【0176】

本実施形態の階層型コンプライアンス制御装置の構成は、図2に示した階層型コンプライアンス制御の構成と同様である。ただし、図36（床形状推定器付き階層型コンプライアンス動作決定部）に示す如く、補償全床反力モーメント分配器114aなどで示される階層型コンプライアンス動作決定部は、図25（6脚ロボット用階層型コンプライアンス動作決定部）に示した構成と異なる。すなわち、本実施形態での階層型コンプライアンス動作決定部は、新たに、床形状推定器130と、床形状推定器130が出力（推定）する各種の推定床形状偏差をそれぞれの修正目標接地部位位置姿勢に加算する加算器132とを備えるようにした。

【0177】

また、これに伴い、本実施形態での制御装置のメインルーチンの制御処理を示す図36のフローチャート（メインフローチャート）は、第1の実施形態の図9に示したものと異なる。すなわち、その相違点を説明すると、本実施形態では、S36の後に、新たにS37で床形状偏差を推定する処理（床形状推定器130の処理）が追加される。さらに、S38では、各補償角と床形状偏差とに応じて各目標接地部位位置姿勢が修正される。

〔階層相対化の定義について〕

本実施形態の詳細な説明に入る前に、床形状推定器130が推定する上で使用する概念と用語を以下のように定義する。

【0178】

図38、図39および図40に示すように、目標歩容において想定された床（あるいは床面）を「想定床」と呼ぶ。ロボットが歩行している実際の床を「実床」と呼ぶ。なお、説明の便宜上、図38～図40では、ロボットを2脚ロボットとして表現しているが、以下に説明する用語の意味は、4脚あるいは6脚等の多脚ロボットにおいても同様である。

【0179】

前記した階層型コンプライアンス制御において定義された目標第 n 接地部位床反力中心点 Q_n は、第 n 接地部位の接地面（床との接触面）に設定された点であった。従って、目標第 n 接地部位床反力中心点 Q_n は、接地部位と共に移動する。これに対応して、目標第 n 接地部位床反力中心点 Q_n と接することが想定された想定床面上の点を「想定第 n 床接点 D_n 」と呼ぶ。

【0180】

この定義から明らかなように、第 n 接地部位が接地している時期では、目標第 n 接地部位床反力中心点 Q_n と想定第 n 床接点 D_n は、支持脚座標系から見て同一座標になる。これに対し、実際にロボット1が歩行しているときに、実第 n 接地部位の足底面上における目標第 n 接地部位床反力中心点 Q_n に相当する点が、実床に接触する点を「実第 n 床接点 D_{nact} 」と呼ぶ。

【0181】

これらの点の関係を表す例を図38、図39および図40に示す。尚、図39は、目標第1接地部位床反力中心点 Q_1 と目標第2接地部位床反力中心点 Q_2 とを通る垂直面の法線方向から（すなわちほぼ側方から）、歩行している2脚ロボットを見たところである。

【0182】

ロボットの目標姿勢（目標歩容のこの瞬間における姿勢）および前記垂直面における想定床の断面を細線で示す。ロボットの実接地部位位置姿勢と前記垂直面における実床の断面を太線で示す。この状況における実第 n 床接点は、実床面上の点であり、図 38、図 39 および図 40 に示す位置になる。

【0183】

想定床面に対する実床面の形状偏差を床形状偏差と呼ぶ。床形状偏差を定量的に表現する指標として、第 n ノード床高さ偏差、第 n ノード床傾斜偏差を以下のように定義する。

【0184】

第 n 床接点における床面の高さを「第 n 接地部位床高さ」と呼ぶ。葉である第 n ノードに対して、実第 n 接地部位床高さと想定第 n 接地部位床高さとの差を「第 n 接地部位床高さ偏差」あるいは、「第 n ノード床高さ偏差」と呼ぶ。第 n 床接点における床面の傾斜を「第 n 接地部位床傾斜」と呼ぶ。葉である第 n ノードに対して、実第 n 接地部位床傾斜と想定第 n 接地部位床傾斜との差を「第 n 接地部位床傾斜偏差」あるいは、「第 n ノード床傾斜偏差」と呼ぶ。

【0185】

接地部位床傾斜偏差の例を図 40 に示す。図 40 は 2 脚ロボットを後ろから見た図である。ロボットの目標姿勢（目標歩容のこの瞬間における姿勢）および想定床の断面を細線で示す。ロボットの実接地部位位置姿勢と実床の断面を太線で示す。

【0186】

葉ノードである、あらゆる第 j ノードに対して、目標第 j 接地部位位置姿勢と想定第 j 床面の高さと傾斜（詳しくは、想定第 j 床接点における想定床面の高さと傾斜）の関係と、ノード補償角の組を用いたコンプライアンス動作によって修正された修正目標第 j 接地部位位置姿勢と実第 j 床面の高さと傾斜（詳しくは、実第 j 床接点における実床面の高さと傾斜）の関係とが一致するためのノード補償角の組を「ノード床傾斜偏差（の組）」と呼び、このうちの第 n ノード補償角に対するノード床傾斜偏差成分を「第 n ノード床傾斜偏差」と呼ぶ。このように定義した「第 n ノード床傾斜偏差」は、第 n ノードが葉ノードである場合、先に上記で葉ノードに関して定義した「第 n ノード床傾斜偏差」に一致するものである。

【0187】

結局、ノード床傾斜偏差は、目標歩容通りに歩行しているロボットの第 n 接地部位を、目標床面に平行になっている状態から、実床面に平行にさせるために必要な補償量に相当する。

【0188】

従って、歩行中に床形状偏差を推定し、推定した床形状偏差を目標接地部位位置姿勢に加えれば、床形状偏差があっても、各ノードの実床反力モーメントは想定床を歩行しているときと同一になる。当然、葉ノードの実床反力モーメントである接地部位の実床反力モーメントも目標接地部位床反力モーメントに一致する。

【0189】

通常は、上記のごとく定義される「第 n ノード床傾斜偏差」を用いて床形状を表現して構わないが、あるノードが 3 つの子ノードを持ち、3 つの子ノードの目標床反力中心点が同一直線上に並ぶ場合や、あるノードが 4 つ以上の子ノードを持つ場合などでは、床形状を表現することが困難になる。

【0190】

そこで、以降の説明においては、葉でない第 n ノードに対しては、より一般的に適用できる以下の表現を用いることとする。以下の定義における所定の重み付き平均を求めるために用いる重みは、目標床反力分配器が決定した前述の重みと同一のものとする。

定義：

すべての目標接地部位の高さと傾斜を対応する実床面の高さと傾斜に一致させ、かつ、任意のノードの目標床反力中心点をそのすべての子ノードの目標床反力中心点の所定の重み付き平均（すなわち所定の内分比による内分点）で表したときに、任意の第 n ノードに対

し、第 n ノードの目標床反力中心点高さから第 n ノードの親ノードの目標床反力中心点高さを減じた高さを「実第 n ノード相対床高さ」と呼ぶ。

定義:

すべての目標接地部位の高さと傾斜を対応する想定床面の高さと傾斜に一致させ、かつ、任意のノードの目標床反力中心点をそのすべての子ノードの目標床反力中心点の所定の重み付き平均（すなわち所定の内分比による内分点）で表したときに、任意の第 n ノードに対し、第 n ノードの目標床反力中心点高さから第 n ノードの親ノードの目標床反力中心点高さを減じた高さを「想定第 n ノード相対床高さ」と呼ぶ。

【0191】

実第 n ノード相対床高さから想定第 n ノード相対床高さを減じた高さを「第 n ノード相対床高さ偏差」と呼ぶ。第 n ノード相対床高さ偏差は、以下のように定義しても、同一値となる。

定義:

すべての目標接地部位の高さと姿勢を対応する接地部位床高さ偏差と接地部位床傾斜偏差に一致させ、かつ、任意のノードの目標床反力中心点をそのすべての子ノードの目標床反力中心点の所定の重み付き平均（すなわち所定の内分比による内分点）で表したときに、任意の第 n ノードに対し、第 n ノードの目標床反力中心点高さから第 n ノードの親ノードの目標床反力中心点高さを減じた高さを「第 n ノード相対床高さ偏差」と呼ぶ。

【0192】

図 37（床形状推定器付き階層型コンプライアンス動作決定部）に示す構成における床形状推定器 130 への入力は、大きく分けて以下になる。

- 1) 各目標床反力中心点（目標全床反力中心点、目標第 n 接地部位床反力中心点）、
- 2) 想定床面形状（想定第 n 床接点の座標、想定第 n 接地部位床傾斜）、
- 3) 最終的に実ロボットが追従すべき目標姿勢（機構変形入り修正目標接地部位位置姿勢）または実関節変位またはこれらの周波数重み付き平均、
- 4) 上体傾斜偏差、
- 5) 実床反力（実第 n 接地部位床反力の並進力成分とモーメント成分）

床形状推定器 130 のメイン処理機能ブロック図を図 41（床形状推定メイン処理ブロック図）に示す。図 41（床形状推定メイン処理ブロック図）に示す床形状推定器 130 を構成する各機能要素について説明すると、床形状推定器 130 は機構コンプライアンスモデル 134 を備える。

【0193】

機構コンプライアンスモデル 134 は、ロボット幾何学モデル 110（図 2 参照）への入力、即ち、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢が、実床反力を受けたときのコンプライアンス機構 42 の変形量を求め、求めた変形量を機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢に加えることにより、機構変形後の推定各接地部位位置姿勢 ($n=1, 2, \dots$) を求める。ここで、機構変形後の各推定接地部位位置姿勢は、上体 24 に対する相対位置姿勢で表現される。

【0194】

機構変形後の推定各接地部位位置姿勢を求める際に、ロボットの関節変位制御の追従遅れが無視できない場合には、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢をそのまま用いる代わりに、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢に、追従遅れに相当するローパスフィルタを通した位置姿勢を用いれば良い。

【0195】

あるいは、実関節変位からロボット幾何学モデル（図 2 に参照符号を付したロボット幾何学モデルと同様のモデル）を介して機構変形なし実接地部位位置姿勢を求め、求めた値を機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢の代わりに用いれば良い。

【0196】

あるいは、周波数重みを用い、前記機構変形なし実接地部位位置姿勢と機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢の重み付き平均を求め、それを機構変形補償入り修正目標接

地部位位置姿勢の代わりに用いれば良い。

【0197】

厳密には、前記した機構変形なし実接地部位位置姿勢を用いるべきであるが、関節変位制御の能力が高ければ、上記のいずれでも大差はない。

【0198】

機構コンプライアンスモデルについては、本出願人が先に提案した特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）において詳細が説明してあるので、ここではこれ以上の説明を省略する。

【0199】

また、図2においてロボット幾何学モデル110への入力に機構変形補償が含まれない場合、機構変形補償のない修正目標接地部位位置姿勢を機構コンプライアンスモデル134に入力すれば良い。

【0200】

図41（床形状推定メイン処理ブロック図）の説明に戻ると、次いで、機構変形後の推定各接地部位位置姿勢($n=1, 2, \dots$)を、目標全床反力中心点を回転中心として θ_{berr} だけ回転移動させることにより、グローバル座標系から見た機構変形後の第 n 推定接地部位位置姿勢($n=1, 2, \dots$)を求める。次いで、グローバル座標系から見た機構変形後の第 n 推定接地部位位置姿勢($n=1, 2, \dots$)と目標接地部位から見た目標第 n 接地床反力中心点とを基に、グローバル座標系から見た機構変形後の目標第 n 接地床反力中心点に対応する点の位置を求め、これをもって、瞬間推定床接点位置 $Q_{n_estm'}$ とする。尚、瞬間推定床接点位置 $Q_{n_estm'}$ の求め方の詳細は、特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）の式21の Q'' を求めることに相当するので、ここではこれ以上の説明を省略する。

【0201】

次いで、瞬間推定第 n 床接点位置 $Q_{n_estm'}$ から想定第 n 床接点位置 D_n を減じることにより、バイアス含有瞬間第 n 接地部位床高さ偏差 $Z_{fn_with_bias'}$ を得る。

【0202】

ここで、想定第 n 床接点 D_n は、先に定義したように、第 n 接地部位が接地している時期においては、目標第 n 接地部位床反力中心点 Q_n と同一位置とする。目標歩容において第 n 接地部位が接地する直前の時期では、次に接地する時に想定されている目標第 n 接地部位床反力中心点 Q_n の位置を想定第 n 床接点 D_n とする。目標歩容において第 n 接地部位が離床した直後の時期では、離床時に想定されていた目標第 n 接地部位床反力中心点 Q_n の位置を想定第 n 床接点 D_n とする。

【0203】

次いで、バイアス含有瞬間第 n 接地部位床高さ偏差 $Z_{fn_with_bias'}$ ($n=1, 2, \dots$)と第 n 接地部位床反力 F_{n_act} ($n=1, 2, \dots$)を基に、図44の床高さ偏差推定処理サブルーチンによって、推定第 n ノード床高さ偏差 Z_{fn_estm} ($n=1, 2, \dots$)を求める。

【0204】

ここで、床高さ偏差推定処理サブルーチン等に用いられる「階層相対化処理」について説明する。

【0205】

階層相対化処理とは、一般的に定義すると、すべての葉ノードに対応する入力値の組に対して、すべてのノードの出力値を決定する処理であり、葉ノードでない任意のノードのすべての子ノードに対応する出力値の重み付き平均が0であり、かつ、任意の葉ノードの入力値が、そのノードの出力値とそのノードのすべての先祖ノードの出力値の和に一致するように出力値を決定する処理のことである。

【0206】

以降、ある入力AAを入力として、階層相対化処理によってある出力BBを出力として求めることを、「AAを階層相対化してBBを求める」と言う。

【0207】

以下に階層相対化処理のアルゴリズムを説明する。一般的に、階層相対化処理の入力を

第 n 接地部位高さ Z_{fn} (n は葉ノード番号)、出力を第 n ノード相対高さ Z_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$, 最終ノード番号)とする。

【0208】

まず、バイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ を以下のように決定する。すなわち、第 n ノードが葉ノード(すなわち接地部位)であるならば、バイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ に第 n 接地部位高さ Z_{fn} の値を代入する。第 n ノードが葉ノード(すなわち接地部位)でないならば、第 n ノードのすべての子ノードのバイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ の重み付き平均を求め、これをもってバイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ とする。ただし、各子ノードに対する重みには、前記床反力分配器が決定した重み W_j ($j=1, 2, \dots$)を用いる。

【0209】

すなわち、以下の式によって、バイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ を得る。
第 n ノードが葉ノードである場合、

$$Z_{n_with_bias} = Z_{fn}$$

第 n ノードが葉ノードでない場合、

$$j \in \{\text{第 } n \text{ ノードの子ノード番号の集合}\}$$

$$Z_{n_with_bias} = \sum (Z_{j_with_bias} * W_j)$$

…式 3 2

以上のルールに従って、すべてのノードに対してバイアス含有ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ ($n=1, 2, \dots$, 最終ノード番号)を求める。

【0210】

最後に、第 n ノードの親ノード(第 h ノードであったとする)のバイアス含有高さ $Z_{h_with_bias}$ をバイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ から減じることにより、第 n ノード相対床高さ偏差 Z_{n_rel} を求める。

【0211】

すなわち、次式により第 n ノード相対床高さ Z_{n_rel} を求める。ただし、第 h ノードは、第 n ノードの親ノードであるとする。

$$Z_{n_rel} = Z_{n_with_bias} - Z_{h_with_bias}$$

…式 3 3

以上のルールに従って、すべてのノードに対してノード相対床高さ Z_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$, 最終ノード番号)を求める。図 4 2 に 4 脚ロボットのノード相対床高さの算出例を示し、図 4 3 に 6 脚ロボットのノード相対床高さの算出例を示す。

【0212】

バイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_rel_with_bias}$ は、同一の結果が得られる以下の方法によって求めても良い。

【0213】

第 n ノードが葉ノード(すなわち接地部位)であるならば、バイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ に第 n 接地部位高さ Z_{fn} の値を代入する。第 n ノードが葉ノード(すなわち接地部位)でないならば、第 n ノードのすべての子孫の葉ノードのバイアス含有高さの重み付き平均を求め、これをもってバイアス含有第 n ノード高さ $Z_{n_with_bias}$ とする。ただし、各葉ノード j に対する重み W_j' は、そのノードに対応する前記床反力分配器が決定した重み W_j とそのノードの祖先のノードかつ第 n ノードの子孫のノードであるすべてのノードに対応する前記床反力分配器が決定した重みとの積とする。

【0214】

すなわち、以下の式によって、バイアス含有第 n ノード高さ偏差 $Z_{n_with_bias}$ を得る。
第 n ノードが葉ノードであるならば、

$$Z_{n_with_bias} = Z_{fn}$$

第 n ノードが葉ノードでないならば、

$$j \in \{\text{ノード } n \text{ の子孫の葉ノード番号の集合}\}$$

$$Zn_with_bias = \Sigma (Zj_with_bias * Wj')$$

…式 3 4

なお、重み Wj' は、目標第 j ノード床反力が0でなければ、各葉ノードの目標床反力を目標第 j ノード床反力で割った値に一致する。

【0215】

以上が階層相対化処理である。

【0216】

次いで、床高さ偏差推定処理サブルーチンの処理を、図44（床高さ偏差推定処理サブルーチン）等を用いて以下に説明する。

【0217】

まず、S50において、バイアス含有瞬間第 n 接地部位床高さ偏差 Zfn_with_bias' を階層相対化して瞬間第 n ノード相対床高さ偏差 Zn_rel' を求める。

【0218】

次いで、S52において、前回制御周期に求めた推定第 n 接地部位床高さ偏差（以降、これを前回推定第 n 接地部位床高さ偏差 Zfn_estm_p と呼ぶ）を階層相対化して、前回推定第 n ノード相対床高さ偏差 $Zn_rel_estm_p$ ($n=1, 2, \dots$ 最終ノード番号)を求める。ただし、各ノードに対する重みには、前記床反力分配器が決定した今回重み Wn ($n=1, 2, \dots$)を用いる。

【0219】

補足すると、一般的に、前回重みと今回重みが異なる場合には、実際の床の形状に変化がなくても、前回重みを用いて求めた各ノードの前回推定相対床高さ偏差の値と今回重みを用いて求めた各ノードの前回推定相対床高さ偏差の値は異なる値になってしまう。そこで、前回制御周期に求めた各ノードの推定相対床高さ偏差をそのまま各ノードの前回推定ノード相対床高さ偏差として用いず、上記のごとく、今回重みを用いて各ノードの前回推定ノード相対床高さ偏差を改めて計算するようにした。

【0220】

次いで、S54において、次式により、第 n ノード相対床高さ偏差補正量候補値 Zn_inc_cand ($n=1, 2, \dots$ 最終ノード番号)を求める。

【0221】

すなわち、瞬間第 n ノード相対床高さ偏差 Zn_rel' と前回推定第 n ノード相対床高さ偏差 $Zn_rel_estm_p$ の差と所定の係数($\Delta T / (Testm + \Delta T)$)との積をもって、第 n ノード相対床高さ偏差補正量候補値 Zn_inc_cand とする。

【0222】

$$Zn_inc_cand = (Zn_rel' - Zn_rel_estm_p) \\ * \Delta T / (Testm + \Delta T)$$

…式 3 5

ここで、 $Testm$ は推定の時定数であり、 ΔT は制御周期である。

【0223】

次いで、S56において、目標歩容の時期に応じて各ノードのノード要求モード（第 n 要求モード mdn_dmd ）を決定する。

具体的には、本実施の形態の6脚ロボットにおいては、第 n ノード要求モード ($n=1, 2, 3, 4, 5, 6$)、第145ノード要求モード $md145dmd$ 、第236ノード要求モード $md236dmd$ および第145236ノード要求モード $md145236dmd$ を、目標歩容の時間経過に対して図45（要求モードの図）のように設定し、これにしたがって現在の要求モードを決定する。ただし、歩容が異なれば、それに応じてモードパターンも変えるべきである。

【0224】

補足すると、特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）に示したように、接地部位として足平を持ち、接地部位における床傾斜偏差を推定することができるロボットの場合には、接地部位の床傾斜偏差推定に対応する要求モードも、本出願人が先に提案した特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）に説明して

いるように設定すべきである。

【0225】

ノード要求モードには、準備完了モード、ホールドモード、リセットモードがある。準備完了モードは、床形状を推定するモードである。ホールドモードは、床形状推定値をホールドする（直前の値を維持する）モードである。ホールドモードは、床形状推定値が発散する恐れがある時期およびその精度が低下する恐れがある時期に存在させる。リセットモードは、床形状推定値を次の推定までに所定の初期値に移行させるモードである。

【0226】

葉ノードである第 n ノード ($n=1, 2, 3, 4, 5, 6$) に対しては、目標第 n 接地部位が接地しているならば、（すなわち目標第 n 接地部位床反力が 0 でないならば、）第 n ノード要求モードを準備完了モードに設定する。その後、目標第 n ノード接地部位が離床したならば、第 n ノード要求モードをホールドモードにする。その後しばらくしたら第 n ノード要求モードをリセットモードにする。

【0227】

また、葉ノードでない第 n ノードの目標床反力が 0 でない場合には、第 n ノード要求モードはリセットモードにしない。

【0228】

次いで、S58において、推定許可条件を満足するか否かを判定し、判定結果とノード要求モードに基づき各ノードのモードを決定する。推定許可条件とは、以下のいずれかの式を満足することである。

【0229】

$$F_{n_act_z} > F_{n_min} \quad \dots \text{式 3 6}$$

$$Z_{n_rel}' < Z_{n_rel_estm_p} \quad \dots \text{式 3 7}$$

ここで、 $F_{n_act_z}$ は、実第 n 接地部位床反力の並進力鉛直成分である。

推定許可条件とは、推定しても、推定値が発散しない条件である。ここで発散とは、後述するごとく推定された推定第 n ノード床高さ偏差 Z_{n_estm} を用いて、実際の第 n ノード床高さ偏差の影響を打ち消すように修正目標接地部位位置姿勢を修正する補正動作を行った場合に、推定第 n ノード床高さ偏差 Z_{n_estm} が増加し続け、第 n 接地部位が床から離れて行く状況を意味する。

【0230】

推定が理想的に実行されるならば、所定の許容値 F_{n_min} は、0 で良いが、実際には検出誤差が生じ、それにより推定値が発散する場合がある。それを防ぐために、 F_{n_min} は、検出誤差よりも十分に大きい値に設定する。

【0231】

推定許可条件とは、以上に述べた発散が生じない条件であれば良い。従って、実第 n 接地部位床反力 F_{n_act} の並進力鉛直成分の代わりに、実第 n 接地部位床反力の力成分 F_{n_act} の内の第 n 想定床面（あるいは第 n 推定床面）に垂直な成分を用いても良い。

【0232】

なお、床形状偏差の推定値を推定するだけで歩行動作に反映しない場合、すなわち、床形状偏差推定値を用いて床形状偏差の影響を打ち消すように修正目標接地部位位置姿勢を修正しない場合には、推定値が発散することはない。

【0233】

推定許可条件を満足するか否かの判定結果とノード要求モードに基づき各ノードのモードを決定する。

第 n ノード要求モードが準備完了モードであり、かつ、推定許可条件を満足するならば、第 n ノードモードを準備完了モードとする。

第 n ノード要求モードが準備完了モードであり、かつ、推定許可条件を満足しないならば、第 n ノードモードをホールドモードとする。

第 n ノード要求モードがホールドモードであるならば、第 n ノードモードをホールドモ

ドとする。

第 n ノード要求モードがリセットモードであるならば、第 n ノードモードをリセットモードとする。

【0234】

次いで、S60～S70において、すべてのノードに対し、ノードに対応する床形状を推定する。

【0235】

補足すると、特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）に示したように、接地部位として足平を持ち、接地部位における床傾斜偏差を推定することができるロボットの場合には、接地部位に対応した床傾斜偏差を推定させることが望ましい。

【0236】

具体的には、S62において、第 n ノードの子ノード数を判定し、子ノード数が2個の場合には、2子ノード用床形状推定処理を行ない、子ノード数が3個の場合には、S66で、3子ノード用床形状推定処理を行ない、子ノード数が0個の場合には、S68で、接地部位が床反力モーメントを制御できるか否かを判定する。

【0237】

子ノード数が0の場合の処理について述べると、第 n ノードの子ノード数が0の場合、第 n ノードは葉ノードであり、第 n ノードは接地部位に対応しているので、まず、第 n 接地部位が床反力モーメントを制御できるか否かを判定する。例えば、通常の2足歩行ロボットのように接地部位に足平を持ち、脚にフリージョイントを含まないロボットの場合には、接地部位で床反力モーメントを発生することができるが、第1の実施形態においては、脚先端部にフリージョイントがあるためにいずれの接地部位も床反力モーメントを発生することができない。

【0238】

床反力モーメントを制御できると判定された場合には、S70において、接地部位床傾斜偏差推定処理を行なう。この処理は、接地部位床傾斜を推定する処理であり、この処理は、本出願人が先に提案した特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）の中の足平床傾斜推定処理において、足平床反力中心点を第 n ノード床反力中心点に置き換えた処理である。したがって、ここでは、これ以上の詳細説明を省略する。

【0239】

次いで、2つの子ノード用床形状推定処理を図46～図49を参照して説明する。

【0240】

まず、図44のS62で、第 n ノードの子ノードの数が「2」と判断されると、図46（2つの子ノードを持つノード用床形状推定処理）に示されるように、S6400において、子ノードのモードが何であるかを判断する。その判断結果は、「すべて準備完了」、「すべてリセット」、もしくは、「すべてホールド」の3つに分けられる。ここで、子ノードのモードが「すべて準備完了」と判断すると、S6402において、第 n ノードの子ノードの床反力の合力が所定の値 F_{n_min2} より大きいかなんかを判断する。この判断結果がYESである場合には、S6404において、図47（2つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理）に示すように、2つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理を行う。また、第 n ノードの子ノードの床反力の合力が所定の値 F_{n_min2} より小さい場合（S6402の判断結果がNOである場合）には、床形状推定精度が下がり過ぎるので、本来推定すべきところを行わずに、S6406において、ホールド処理が行われる。そのホールド処理は図49（2つの子ノードを持つノード用全ホールド処理（モード i 、モード j がすべてホールドモードである場合））に示すように行われる。

【0241】

次に図46で、子ノードのモードが「すべてリセット」と判断すると、2つの子ノードを持つノード用全リセット処理S6408で行われる。そのリセット処理は図48（2つの子ノードを持つノード用全リセット処理（モード i 、モード j がすべてリセットモードである場合））に示すように行われる。

【0242】

最後に図46で、子ノードのモードが「すべてホールド」と判断すると、2つの子ノードを持つノード用全ホールド処理がS6410で行われる。そのホールド処理は図49（2つの子ノードを持つノード用全ホールド処理（モードi，モードjがすべてホールドモードである場合））に示すように行われる。

【0243】

次いで、3つの子ノード用床形状推定処理を図50～図56を参照して説明する。

【0244】

まず、図44のS62で、第nノードの子ノードの数が「3」と判断されると、図50（3つの子ノードを持つノード用床形状推定処理）に示されるように、子ノードのモードが何であるかをS6600において判断する。その判断結果は、「すべて準備完了」、「すべてリセット」、「すべてホールド」、「2つの子ノードのみ準備完了」、「1つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」、もしくは「2つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」の6つに分けられる。ここで、子ノードのモードが「すべて準備完了」と判断すると、S6602において、第nノードの子ノードの床反力の合力が所定の値 F_{n_min2} より大きいかなんかを判断する。この判断結果がYESである場合には、S6604において、図51（3つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理）に示すように、3つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理を行う。また、S6602の判断結果がNOである場合には、床形状推定精度が下がり過ぎるので、本来推定すべきところを行わずに、S6606でホールド処理が行われる。そのホールド処理は、図54（3つの子ノードを持つノード用全ホールド処理（モードi，モードj，モードkがすべてホールドモードである場合））に示すように行われる。

【0245】

また図50で子ノードのモードが「すべてリセット」と判断すると、S6608において、3つの子ノードを持つノード用全リセット処理が行われる。そのリセット処理は、図53（3つの子ノードを持つノード用全リセット処理（モードi，モードj，モードkがすべてリセットモードである場合））に示すように行われる。

【0246】

この処理を一般的に説明すると、 Zi_rel_estm ， Zj_rel_estm ， Zk_rel_estm を、 $Wi*Zi_rel_estm + Wj*Zj_rel_estm + Wk*Zk_rel_estm = 0$ を満足しつつ、それぞれ $Zi_rel_estm_p$ ， $Zj_rel_estm_p$ ， $Zk_rel_estm_p$ よりも0に近い値に決定する。また、本出願人が先に提案した有限整定関数発生器（特開平5-324115号公報）を用いてもよい。

【0247】

更に図50で子ノードのモードが「すべてホールド」と判断すると、S6610において、3つの子ノードを持つノード用全ホールド処理が行われる。そのホールド処理は、図54（3つの子ノードを持つノード用全ホールド処理（モードi，モードj，モードkがすべてホールドモードである場合））に示すように行われる。

【0248】

子ノードが2つの時と違い、上記したように、3つの子ノードのモードが、「2つの子ノードのみ準備完了」、「1つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」、もしくは「2つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」の場合も考慮する必要がある。そして、図50で子ノードのモードが「2つの子ノードのみ準備完了」と判断すると、第nノードの子ノードの床反力の合力が所定の値 F_{n_min2} より大きいかなんかをS6612で判断する。この判断結果がYESである場合には、S6614において、図52（3つの子ノードを持つノード用グループ内部分推定処理（モードiが推定モードではなく、モードj，モードkが推定モードである場合））に示すような処理が行われる。この処理の中で、 Zj_inc_cand' と Zk_inc_cand' を求めるステップを説明すると、すなわち、 $Wi*Zi_inc_cand' + Wj*Zj_inc_cand' + Wk*Zk_inc_cand' = 0$ と式を設定し、 $Zj_inc_cand' - Zj_inc_cand = Zk_inc_cand' - Zk_inc_cand$ を満足するように Zj_inc_cand' ， Zk_inc_cand' を決定する。言い換えると、 $Wi*Zi_rel_estm + Wj*Zi_rel_estm + Wk*Zk_rel_estm =$

0を満足しつつ、 $Zj_rel_estm - Zk_rel_estm$ が $Zj_inc_cand - Zk_inc_cand$ に近づくように Zi_rel_estm , Zj_rel_estm , Zk_rel_estm を決定する。これらのように1次遅れ要素を用いると、リセットモードで完全に0に戻るためには、無限時間を要するので、上記した本出願人が先に提案した有限整定関数発生器（特開平5-324115号公報）を用いて、有限時間で0に戻るようにしても良い。

【0249】

また、S6612の判断結果がNOである場合には、床形状推定精度が下がり過ぎるので、本来推定すべきところを行わずに、S6616においてホールド処理が行われる。そのホールド処理は、図54（3つの子ノードを持つノード用全ホールド処理（モードi, モードj, モードkがすべてホールドモードである場合））に示すように行われる。

【0250】

また図64で子ノードのモードが「1つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」と判断すると、S6618において、3つの子ノードを持つノード用1つの子モードのみホールドで、残りがリセットの場合の処理が行われる。その処理は、図55（3つの子ノードを持つノード用1つの子モードのみホールドで、残りがリセットの場合の処理（モードiがホールドモード、モードj, モードkがリセットモードである場合））に示すように行われる。この処理を説明すると、より一般的には、 Zi_rel_estm を0に決定し、 Zj_rel_estm , Zk_rel_estm を、 $Wi*Zi_rel_estm + Wj*Zj_rel_estm + Wk*Zk_rel_estm = 0$ を満足しつつ、 $Zj_rel_estm_p$, $Zk_rel_estm_p$ よりも0に近い値に決定する。また、本出願人が先に提案した有限整定関数発生器（特開平5-324115号公報）を用いてもよい。補足すると、モードj, モードkが共にリセットモードになる時点までに、 Wj , Wk は0となっているはずである。従って、重みの和が1であるという条件から、この時点までに Wi が1となっており、また、 $Wi*Zi_rel_estm + Wj*Zj_rel_estm + Wk*Zk_rel_estm = 0$ であるから、この時点までに、 Zi_rel_estm は0になっている。

【0251】

更に図50で子ノードのモードが「2つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」と判断すると、S6620において、3つの子ノードを持つノード用2つの子モードのみホールドで、残りがリセットの場合の処理が行われる。そのホールド処理は、図56（3つの子ノードを持つノード用2つの子モードのみホールドで、残りがリセットの場合の処理（モードi, モードjがホールドモード、モードkがリセットモードである場合））に示すように行われる。この処理を説明すると、より一般的には、 Zi_rel_estm を0に決定し、 Zj_rel_estm , Zk_rel_estm を、 $Wi*Zi_rel_estm + Wj*Zj_rel_estm + Wk*Zk_rel_estm = 0$ を満足しつつ、 $Zj_rel_estm_p$, $Zk_rel_estm_p$ よりも0に近い値に決定する。また、本出願人が先に提案した有限整定関数発生器（特開平5-324115号公報）を用いてもよい。補足すると、 mdk がリセットモードになる時点までに、 Wk は0となっている。

【0252】

以上のごとく、推定第nノード相対床高さ偏差 Zn_rel_estm が決定される。

【0253】

最後に図44に戻って、S72において、第nノード($n=1, 2, \dots$, 最終ノード番号)のすべての先祖ノードの推定相対床高さ偏差と推定第nノード相対床高さ偏差との和を求め、求めた和を推定第nノード床高さ偏差 Zfn_estm とする。

【0254】

以上が、床高さ偏差推定処理サブルーチンの処理である。

【0255】

さらに、推定第nノード床高さ偏差 Zfn_estm ($n=1, 2, \dots$ 最終葉ノード番号)は、図37（床形状推定器付き階層型コンプライアンス動作決定部の図）に示すように、修正目標接地部位位置姿勢に加算され、床形状推定入り修正目標接地部位位置姿勢として機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部へ入力される。

【0256】

以上の処理を毎制御周期に繰り返し実行することにより、推定第nノード床高さ偏差 Zfn

_estmが実際の第nノード床高さ偏差に収束する。また、接地部位位置姿勢は推定第nノード床高さ偏差Zfn_estmに従って修正され、実際の第nノード床高さ偏差が実床反力に及ぼす影響を吸収する。

【0257】

尚、すべての実第n接地部位 ($n=1, 2, \dots$, 最終葉ノード番号) が接地しているならば、実第n接地部位の接地面上における目標第n接地部位床反力中心点 Q_n に相当する点は、実第n床接点 D_{n_act} に一致するはずである。従って、瞬間第nノード相対床高さ偏差は、変動しないはずである。しかし、実際にはロボット1の機械系や制御系の振動および電氣的なノイズにより、上記計算アルゴリズムによって得られた瞬間第nノード相対床高さ偏差は、激しく変動する。従って、瞬間第nノード相対床高さ偏差をそのまま推定第nノード相対床高さ偏差として用いて、これを基に推定第n床高さ偏差Zfn_estmを求め、(すなわち第nノード ($n=1, 2, \dots$, 最終ノード番号) のすべての先祖ノードの瞬間相対床高さ偏差と瞬間第nノード相対床高さ偏差との和をもって推定第n床高さ偏差Zfn_estmとし)、図37 (床形状推定器付き階層型コンプライアンス動作決定部) に示すように、推定第n床高さ偏差Zfn_estmを修正目標接地部位位置姿勢に加算したものを床形状推定入り修正目標接地部位位置姿勢として機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部へ入力させると、ロボット1の接地部位は発振するかあるいは激しく振動する。

【0258】

ところで、2つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理、3つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理、3つの子ノードを持つノード用グループ内部分推定処理では、瞬間第nノード相対床高さ偏差 Zn_rel' から推定第nノード相対床高さ偏差 Zn_rel_estm までの伝達関数は、1次遅れのローパスフィルタになる。即ち、推定第nノード相対床高さ偏差 Zn_rel_estm は瞬間第nノード相対床高さ偏差 Zn_rel' にローパスフィルタを通したものとなる。従って、推定第nノード相対床高さ偏差 Zn_rel_estm を基に求めた推定第n床高さ偏差Zfn_estmを図37に示すように修正目標接地部位位置姿勢に加算しても、接地部位の発振や振動を生じ難くなる。

【0259】

ちなみに、この例では、ローパスフィルタの時定数はTestmである。これらの処理以外にも、瞬間第nノード相対床高さ偏差 Zn_rel' から推定第nノード相対床高さ偏差 Zn_rel_estm までの伝達関数がローパスフィルタになるように構成すれば良い。これにより、接地部位の発振や振動を防止することができる。

[本実施形態の床形状推定器の特徴について]

次いで、この実施の形態における床形状推定器の特徴を説明する。

【0260】

姿勢安定化制御のために必要な各ノード補償モーメントを発生させようと、各ノード補償角を変化させ、最終的な目標接地部位位置姿勢である機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を変更させても、各実接地部位が接地している限り、実第n接地部位の接地面上における目標第n接地部位床反力中心点 Q_n に相当する点は、実第n床接点 D_{n_act} に一致したまま動かず、その代わりに、コンプライアンス機構42が変形したり、上体24の位置姿勢が変化する。即ち、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を変更させた分を打ち消すように、コンプライアンス機構42が変形したり、上体24の位置姿勢が変化する。

この実施の形態における床形状推定器は、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢から推定第n床高さ偏差Zfn_estmを算出するまでに、実床反力を基に機構コンプライアンスモデル134によって算出された機構部変形量と姿勢センサ36によって検出された実上体姿勢傾斜偏差による推定第n床高さ偏差Zfn_estmへの影響を打ち消しているため、実上体姿勢傾斜偏差が生じたり、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢が変動しても、推定第n床高さ偏差Zfn_estmはその影響を受けない。

これは、床形状推定が、コンプライアンス制御や姿勢制御から干渉を受けないことを意味する。従って、推定第n床高さ偏差Zfn_estmを図37 (床形状推定器付き階層型コンプラ

イアンス動作決定部の図)に示すように修正目標接地部位位置姿勢に加算しても、制御系の安定余裕(発振のし難さ)はほとんど低下しない。すなわち、コンプライアンス制御(姿勢制御)、床形状推定および床形状推定値を用いた補正動作を同時に行なっても、各処理が干渉し合って発振することはほとんどない。すなわち、簡単に言えば、床形状偏差の複数のパラメータを同時に推定しながら、床形状偏差が床反力に及ぼす影響を打ち消すための脚の補償動作も同時に実行することができる。さらには、姿勢制御のための脚の補償動作も同時に実行することができる。

【0261】

また、推定第 n 床高さ偏差 Z_{fn_estm} を図37(床形状推定器付き階層型コンプライアンス動作決定部の図)に示すように修正目標接地部位位置姿勢に加算すると、実際に第 n 床高さ偏差が存在していても、その影響を打ち消すことができるので、実全床反力は、定常的には想定床を歩行している場合と同一になる。しかも、推定第 n 床高さ偏差 Z_{fn_estm} の推定と推定第 n 床高さ偏差 Z_{fn_estm} を用いた修正目標接地部位位置姿勢の修正は毎制御周期に実行されるので、床形状が途中で変化しても、変化後の第 n 床高さ偏差を推定し、推定値に基づいてその影響を打ち消すことができる。ただし、床形状推定器には前述したようにローパスフィルタが含まれるので、接地部位が接地した直後や床形状が途中で変化したときには、過渡的には、実全床反力は、床形状偏差の影響を受ける。しかし、その後、時定数 $1/Testm$ でその影響が減衰する。

【0262】

また、以下の特徴もある。

- 1) 床形状偏差が大きくても制御が破綻し難い(階層型コンプライアンス制御は微小角に限定した近似を行っていないから)。
- 2) 床形状偏差の推定精度が高い。
- 3) 姿勢安定化制御との干渉による発振が生じにくいので、推定時定数を短くすることができる。それによって、床形状偏差が床反力に及ぼす影響を打ち消すための脚の補償動作の応答性を高めることができるので、床形状偏差が床反力に及ぼす過渡的な影響が短時間で解消される。

【0263】

1歩前の推定第 n 床高さ偏差と次の1歩の推定第 n 床高さ偏差との関係に相関がない場合には、本実施の形態に示したように推定第 n 床高さ偏差を強制的に徐々に0に収束させるのが良い。しかし、例えば、想定床に考慮されていない実床面のうねりがゆったりとしていることが分かっているならば、前記関係にある程度の相関があると考えられるので、推定第 n 床高さ偏差を、強制的に徐々に1歩前の推定第 n 床高さ偏差に1より小さい正の定数を乗じた値に収束させるようにしても良い。

【0264】

さらに、1歩前の推定第 n 床高さ偏差だけでなく、複数歩前の推定第 n 床高さ偏差も用いて収束目標値を決定しても良い。また、現在や1歩前や複数歩前の他のノードの推定第 n 床高さ偏差および推定第 n 床傾斜偏差も用いて収束目標値を決定しても良い。

[床形状推定の特徴について]

本実施形態は上記の如く構成したので、従来技術では困難であった多くの接地部位を持つロボットにおいても、床形状の推定、具体的には、各接地部位に対応する床高さ偏差を同時に、換言すれば複合的に、精度良く推定することができる。さらに床形状推定において床傾斜偏差も推定する場合には、床傾斜偏差も含めて同時に、精度良く推定することができる。

【0265】

さらには、床形状の推定結果を基に接地部位軌道を修正することにより、床形状が想定していた形状と異なっても、その影響を吸収して望み通りの床反力を発生させることができる。

【0266】

特に、床形状推定値による補正がない階層型コンプライアンス制御で除去しきれなかつ

た実床反力の制御目標値からの定常偏差を可能な限り零に近づける、換言すれば床形状の偏差に起因する床反力の定常偏差を解消することができる。

【0267】

また、推定精度が低下する恐れがある状況あるいは推定値が発散する恐れがある状況では床形状推定を中断するように構成したので、前記した作用効果に加え、推定値が不適切なものとなることがない。

【0268】

尚、この実施の形態に係る脚式移動ロボットの床形状推定装置は上記した手法で床形状を推定すれば足り、推定値に基づいて運動を補正することは必須ではない。

〔第4の実施形態について〕

次いで、この発明の第4の実施形態に係る脚式移動ロボットの床形状推定装置を説明する。第4の実施形態においては、詳細は以下に説明するが、簡単に言えば、第3の実施形態の床形状推定処理のブロック線図を等価変換するようにした。すなわち、直前に推定した床形状推定値と最終的に修正され決定された目標歩容（すなわちコンプライアンス動作を含む機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢）（あるいは実関節変位）と実上体姿勢傾斜偏差とを基に、各ノードの床反力を推定し、推定値と各ノードの実床反力との差を基に、この差を0に近づけるように床形状推定値の補正量候補値を決定し、推定が発散しないと判断されるならば、床形状推定値の補正量候補値を基に、直前に推定した床形状推定値を補正するようにした。この処理は、本出願人が先に提案した特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）において、各脚床反力中心点まわりの想定されるモーメントと実モーメントとの差が0に近づくように各足平床傾斜を推定する手段、ならびに、全床反力中心点まわりの想定されるモーメントと実モーメントとの差が0に近づくように両脚間干渉角を推定する手段を発展させた階層型の床形状推定手段に相当するものである。

【0269】

図41（床形状推定メイン処理ブロック図）と別の手法を用いた、本実施形態における図57（床形状推定メイン処理別手法ブロック図）の床形状推定器130を構成する各機能要素について説明すると、床形状推定器130は機構コンプライアンスモデル（逆モデル）を備える。

【0270】

まず、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢 Q_n'' ($n=1, 2, \dots$)、目標接地部位から見た目標第 n 接地床反力中心点($n=1, 2, \dots$)、および実姿勢傾斜偏差 θ_{berr} を入力し、目標全床反力中心点を回転中心として θ_{berr} だけ回転移動させることより、実姿勢傾斜偏差だけ回転した機構変形補償入り修正目標第 n 接地部位位置姿勢 Q_n''' ($n=1, 2, \dots$)を求める。求められた実姿勢傾斜偏差だけ回転した機構変形補償入り修正目標第 n 接地部位位置姿勢 Q_n''' ($n=1, 2, \dots$)から想定第 n 床接地位置 D_n ($n=1, 2, \dots$)と下記に説明する根ノード推定床高さ偏差を減算し、第 n ノード干渉高さ Z_{n_int} を求める。それを上記した機構コンプライアンスモデル（逆モデル）へ入力することによって、推定接地部位床反力を求める。検出した実床反力 F_{nact} ($n=1, 2, \dots$)より求めた前記推定接地部位床反力で減算し、第 n 接地部位床反力推定誤差 $F_{fn_estm_err}$ を求める。求められた第 n 接地部位床反力推定誤差 $F_{fn_estm_err}$ は、力で表現されているため、換算値 C_n （例えば、バネ定数の逆数のようなもの）によって高さ偏差に換算する。また、換算値 C_n は、対角行列とは限らない。そうして、求められる第 n 接地部位床高さ偏差補正量候補値 $Z_{fn_inc_cand}$ は、上記した「階層相対化処理」を行う階層相対比によって、第 n ノード相対床高さ偏差補正量候補値 $Z_{n_inc_cand}$ を求める。次に床高さ偏差推定処理サブルーチンにて、第 n ノード相対床高さ偏差補正量候補値 $Z_{n_inc_cand}$ から推定床高さ偏差 Z_{fn_estm} を求め、床形状推定メイン処理の出力とする。床高さ偏差推定処理サブルーチンの処理に関しては、上記の処理方法と同一である。また、出力として演算処理された推定床高さ偏差 Z_{fn_estm} は、根ノードの推定床高さ偏差だけを求めるため、図57に示すベクトルを乗じ、上記した第 n ノード干渉高さ Z_{n_int} を求めるための値として根ノード推定床高さ偏差を求める。

【0271】

なお、特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）に示したように、接地部位として足平を持ち、接地部位における床傾斜偏差を推定することができるロボットの場合には、接地部位床傾斜偏差推定処理を行なうのが望ましい。この処理は、接地部位床傾斜を推定する処理であり、この処理は、複合コンプライアンス特許の第3実施例の中の足平床傾斜推定処理において、足平床反力中心点を第 n ノード床反力中心点に置き換えた処理である。したがって、ここでは、これ以上の詳細説明を省略する。

【0272】

ここで、第3の実施の形態と第4の実施の形態を比較する。第4の実施の形態は、簡単に言えば、第3の実施の形態のブロック線図を等価変換したものになっている。したがって、第4の実施の形態の作用効果は、第3の実施の形態の作用効果と同様である。また、第3の実施の形態と同様、床形状の推定のみ行なって、推定値に基づいて運動を補正することは必須ではない。

[判定方法の変形例について]

尚、床反力センサとして、分布圧センサを用いても良い。分布圧センサの方が実床反力による接地部位の変形をより細緻に推定することができるので、床形状推定の精度を向上させることができる。

【0273】

さらには、特許第3035051号公報の図1に示す如く、接地部位に接触センサを複数個配置（例えば接地部位の四隅に配置）し、その出力信号に基づいて接地部位がどちらの方向に浮きやすいかを判定しても良い。そして、接地していない接触センサが増々浮く方向への推定を中断する、あるいは、全ての接触センサが浮いているときも推定を中断することなどが考えられる。

[第5の実施形態（子ノードの数が4つ以上の場合への拡張）について]

第 a ノードの子ノードの数が4つ以上の場合にも、重み付き平均の概念を持ち込めば以下に示すようにモーメントおよび傾斜角の概念を拡張できる。

【0274】

目標値、実際値、偏差のいずれに関しても概念を拡張できるので、ここでは、目標値、実際値、偏差の区別をせず、一般的な接地部位床反力の組 $F_n(n=1, 2, \dots)$ に対するモーメントを、以下のように拡張して、定義する。

接地部位床反力の組 $F_n(n=1, 2, \dots, \text{接地部位の数})$ を階層相対化して、第 n ノード相対床反力 $F_{n_rel}(n=1, 2, \dots, \text{ノードの数})$ を求める。

第 n ノードの子ノードの数を r とする。

第 n ノードの第 j 番目の子ノードの識別番号が a_j ($j=a_1, a_2, \dots, a_r$)であるとする。

第 n ノードの第 j 番目の子ノードの重みが、 W_j ($j=a_1, a_2, \dots, a_r$)であるとする。

第 n ノードの第 j 番目の子ノードの重みを第 j 要素として持つ列ベクトルを U_{wn} とする。

【0275】

すなわち、下式のように U_{wn} を定義する。ここで「 \neg 」は、転置を意味し、行ベクトルの転置によって列ベクトルを表現することとする。

【0276】

$$U_{wn} = (Wa_1, Wa_2, \dots, Wa_r)^\neg \quad \dots \text{式 } 38$$

ベクトル U_{wn} に直交する（すなわちベクトル U_{wn} との内積が0となる） $r-1$ 個の互いに独立なベクトルを $R(1), R(2), \dots, R(r-1)$ とする。 $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)は、 r 行1列の列ベクトルである。なお、 $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)は、演算の容易さと制御精度を考慮すると、互いに直交することが望ましい。 $R(j)$ を第 j 列($j=1, 2, \dots, r-1$)とする行列を H_n とする。 H_n は、 r 行 $r-1$ 列の行列である。

【0277】

第 n ノードの第 j 番目の子ノードの相対床反力 F_{aj_rel} を第 j 要素($j=1, 2, \dots, r$)とする列ベクトルを第 n グループ相対床反力ベクトル $F_{n_rel_c}$ とする。

すなわち、

$$Fn_rel_c = (Fa1_rel, Fa2_rel, \dots, Far_rel)^T \quad \dots \text{式 3 9}$$

Fn_rel_c は、 r 行 1 列の列ベクトルである。

次式を満足する列ベクトル Mn_exp を第 n ノード拡張床反力モーメントと呼ぶ。

【0278】

$$Fn_rel_c = Hn * Mn_exp \quad \dots \text{式 4 0}$$

Mn_exp は、 $r-1$ 行 1 列の列ベクトルである。

【0279】

以上のように、接地部位床反力の組 $F_n(n=1, 2, \dots)$ に対し、第 n ノード拡張床反力モーメント Mn_exp を定義する。

【0280】

すなわち、接地部位床反力 $F_n(n=1, 2, \dots)$ を基に、階層化したノード相対床反力 $Fn_rel(n=1, 2, \dots)$ を求め、さらに第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a1, a2, \dots, ar$) の相対床反力を要素とするベクトル $(Fa1_rel, Fa2_rel, \dots, Far_rel)^T$ を、第 n ノードのすべての子ノードの重みを要素とするベクトル $(Wa1, Wa2, \dots, War)^T$ に直交するある所定の互いに独立なベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$) の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張床反力モーメント Mn_exp と呼ぶ。

【0281】

なお、第 n ノード拡張床反力モーメント Mn_exp の第 j 番目要素 (第 j 行目要素) を第 n ノード拡張床反力モーメント第 j 成分と呼ぶ。

【0282】

また、実接地部位床反力の組 $F_n(n=1, 2, \dots)$ に対する第 n ノード拡張床反力モーメントを実第 n ノード拡張床反力モーメント Mn_exp_act と呼ぶ。

【0283】

また、目標接地部位床反力の組 $F_n(n=1, 2, \dots)$ に対する第 n ノード拡張床反力モーメントを目標第 n ノード拡張床反力モーメント Mn_exp_ref と呼ぶ。目標第 n ノード拡張床反力モーメントは、通常 0 ベクトルに設定される。

【0284】

また、接地部位床反力偏差の組 $F_n(n=1, 2, \dots)$ に対する第 n ノード拡張床反力モーメントを第 n ノード拡張床反力モーメント偏差 Mn_exp_err と呼ぶ。

【0285】

同様に、一般的な接地部位高さの組 $Z_n(n=1, 2, \dots)$ に対する傾斜角を、以下のように拡張して、定義する。

【0286】

接地部位高さの組 $Z_n(n=1, 2, \dots, \text{接地部位の数})$ を階層相対化して、第 n ノード相対高さ $Zn_rel(n=1, 2, \dots, \text{ノードの数})$ を求める。

【0287】

第 n ノードの第 j 番目の子ノードの相対高さ Zaj_rel を第 j 要素 ($j=1, 2, \dots, r$) とする列ベクトルを第 n グループ相対高さベクトル Zn_rel_c とする。

すなわち、

$$Zn_rel_c = (Za1_rel, Za2_rel, \dots, Zar_rel)^T \quad \dots \text{式 4 1}$$

次式を満足する列ベクトル θn_exp を第 n ノード拡張床反力傾斜角と呼ぶ。

【0288】

$$Zn_rel_c = Hn * \theta n_exp \quad \dots \text{式 4 2}$$

θn_exp は、 $r-1$ 行 1 列の列ベクトルである。

【0289】

すなわち、接地部位高さ Z_n ($n=1, 2, \dots$)を基に、階層化したノード相対高さ Z_{n_rel} ($n=1, 2, \dots$)を求め、さらに第 n ノードのすべての子ノード a_j ($j=a1, a2, \dots, ar$)の相対高さを要素とするベクトル $(Z_{a1_rel}, Z_{a2_rel}, \dots, Z_{ar_rel})^T$ を、第 n ノードのすべての子ノードの重みを要素とするベクトル $(W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{ar})^T$ に直交する前記所定の互いに独立なベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第 n ノード拡張傾斜角 θ_n と呼ぶ。

【0290】

上記のように定義された拡張床反力モーメントと拡張傾斜角を用いることにより、第 a ノードの子ノードの数が4つ以上の場合にも、コンプライアンス制御および床形状推定の処理は、ほとんどそのまま拡張される。以下にその例を第5の実施形態として説明する。

[補償全床反力モーメント分配器の処理の拡張について]

例えば、コンプライアンス制御の中の補償全床反力モーメント分配器の処理は、次のように拡張される。

【0291】

姿勢を復元させるために目標第 n ノード拡張床反力モーメント $M_{n_exp_rel}$ (通常0)に付加的に発生すべき拡張床反力モーメントを第 n ノード補償拡張床反力モーメント $M_{n_exp_dmd}$ と呼ぶ。

【0292】

第 n ノード補償拡張床反力モーメント $M_{n_exp_dmd}$ と第 n ノード補償床反力モーメント M_{n_dmd} の間には、次式の関係がある。ただし、 C_{n_mech} は、目標各ノード床反力中心点と機構のコンプライアンス特性によって決定される所定の係数行列(2行 $r-1$ 列の行列)である。

【0293】

$$M_{n_dmd} = C_{n_mech} * M_{n_exp_dmd} \quad \dots \text{式 4 3}$$

一方、式10を一般化すると次式になる。

$$M_{dmd} = \sum M_{n_dmd} \quad \dots \text{式 4 4}$$

よって、補償全床反力モーメント分配器では、式43と式44を満足するように、第 n ノード補償拡張床反力モーメント $M_{n_exp_dmd}$ ($n=1, 2, \dots$)および第 n ノード補償床反力モーメント M_{n_dmd} を決定すれば良い。

[θ_n 決定部の処理の拡張について]

θ_n 決定部の処理は、第3の実施形態の θ_{145} 決定部の処理において、 M_{145act} を求めるまでの処理を、前記の実第 n ノード拡張床反力モーメント $M_{n_exp_act}$ を求める処理に置き換え、145を n に置き換え、補償フィルタ、ローパスフィルタおよびゲイン K_n の次元を第 n ノードの子ノード数から1を減じた数に拡張すれば良い。

[拡張床反力モーメントを用いた床形状推定について]

以下のように、床形状推定の処理の一部に拡張床反力モーメントの概念を用いた手法を組み込んでも良い。

【0294】

すなわち、図57(床形状推定メイン処理別手法ブロック図)を、図58(床形状推定メイン処理別手法(傾斜角推定)ブロック図)に置き換える。

【0295】

図58(床形状推定メイン処理別手法(傾斜角推定)ブロック図)を参照して、この処理を説明すると、まず、拡張モーメントの定義にしたがって、第 n 接地部位床反力推定誤差 $F_{fn_estm_err}$ ($n=1, 2, \dots$)に対応する第 n ノード拡張床反力モーメント推定誤差 $M_{n_exp_estm_err}$ を求める。

【0296】

次いで、次式のように、所定の係数マトリックス K_{n_cml} と第 n ノード拡張床反力モー

メント推定誤差 $Mn_exp_estm_err$ の積を求めることにより、第 n ノード拡張傾斜角補正量候補値 θn_inc_cand を求める。

【0297】

$$\theta n_inc_cand = Kn_cmpl * Mn_exp_estm_err \quad \cdots \text{式 4 5}$$

なお、 Kn_cmpl は、対角行列とは限らない。

【0298】

次いで、ベクトル $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, r-1$)に対する係数を θn_inc_cand の第 j 要素として、ベクトル $R(j)$ を線形結合したベクトルを求め、これをもって、第 n ノード相対床高さ偏差補正量候補値 Zn_inc_cand とする。

【0299】

すなわち、次式によって、 Zn_inc_cand を求める。

【0300】

$$Zn_inc_cand = Hn * \theta n_inc_cand \quad \cdots \text{式 4 6}$$

以上のごとく、第 n ノード床反力推定誤差 Fn_estm_err から第 n ノード相対床高さ偏差補正量候補値 Zn_inc_cand を求める処理を置きかえる。

【0301】

床高さ偏差推定処理サブルーチンでは、第 n ノードの子ノード数が4以上の処理を3子ノード用床形状推定処理を拡張して、3子ノード用床形状推定処理と同様に、いずれかの子ノード j に対応する接地部位が浮いて発散してしまいそうな場合には、推定第 j ノード相対床高さ偏差 Zj_rel_estm を前回値 $Zj_rel_estm_p$ に維持しつつ（第 j ノード相対床高さ偏差補正量候補値 Zj_inc_cand を0とし）、それ以外の推定ノード相対床高さ偏差 Zk_rel_estm を前回推定第 k ノード相対床高さ偏差 $Zk_rel_estm_p$ と Zn_inc_cand の和にある所定のバイアス値 c を加えた値に近づくように決定する。ただし、バイアス値 c は、第 n ノードのすべての子ノードの推定ノード相対床高さ偏差の重み付き平均が0になるように決定される。

【0302】

以上のごとく、床形状推定処理を、4個以上の子ノードを持つノードがある場合にも、拡張することができる。しかし、このような処理を行なうよりは、4個以上の子ノードを持たないように、階層構造を決定した方が、演算処理は容易となる。

[第6の実施形態（膝付き姿勢におけるコンプライアンス制御）について]

次いで、この発明の第6の実施の形態に係る脚式移動ロボットのコンプライアンス制御装置を図59～図66を参照して説明する。図59（膝付き姿勢での床接点の図）は、第6の実施の形態に係る脚式移動ロボットが膝を床に付けた状況（ひざまずいた状況）を表す。

【0303】

本実施の形態における本発明の目的は、膝、肘、胴体など、脚腕先端部以外の部分が床あるいは床に固定（設置）された対象物（床の延長と考えられる対象物）と接触する状態において、反力を操作して、姿勢を安定に制御することにある。

【0304】

より具体的には、ひざまずいた状態やいすに座った状態における姿勢制御を可能とすることにある。

【0305】

従来の人間型ロボットには、膝には、床反力を検出センサが備えられておらず、膝に作用する床反力を制御することはできなかった。例えば、図59のようにひざまずいた状態では、左右の膝に作用する床反力は、床の凹凸に依存（支配）され、また、床の凹凸に応じて、脚の関節角を調節することが行われていなかったため、床の凹凸によっては、カタカタと不安定な接地状態になる場合もあった。したがって、ひざまずいた状態において動作や作業を行おうとすると不安定にある場合があった。

【0306】

また、ひざまずいた状態から立ち上がる場合には、実際の床の傾きが想定していた傾きと異なっていた場合には、重心位置が適切に制御されず、姿勢が傾いたまま立ち上がろうとしてしまうために、転倒してしまう恐れもあった。

【0307】

また、いすに座ったまま姿勢を安定に保ちつつ動作や作業を行う場合、いすから立ち上がる場合、あるいはいすに座る場合には、姿勢が適切に復元できるように、足底に作用する床反力のみならず、いすからでん部に作用する反力も適切に制御できることが望ましい。

【0308】

なお、概念的には、いすなどのように床に置かれたものも床と考えれば、前記反力も広義の床反力であると言える。

【0309】

第6の実施形態は、以上のごとき従来方式の問題点に鑑み、前記問題点を解消し、脚式移動装置の膝、肘、胴体、でん部など、脚腕先端部以外の部分が、床あるいは床の延長と考えられる対象物と接触する状態において、脚腕先端部に作用する反力のみならず、脚腕先端部以外の部分に作用する反力をも適切に制御し、脚式移動装置の姿勢を安定に保つことを目的とするものである。

【0310】

本ロボットには、図60および図61に示すように、膝の接地部分に床反力センサ90（荷重センサ）を備える。床反力センサ90の本体92の外側は、スポンジ等の柔軟な部材94によって覆われている。なお、膝の接地部位におけるコンプライアンス制御の精度を良くするために、膝を柔軟な部材94によって覆うだけでなく、その柔軟な部材94の表面（接地部位）を丸く凸面状に作ると良い。こうすることにより、修正動作と床反力の関係の非線形性が小さくなるので、制御特性が良くなる。

【0311】

床反力センサ90としては、以下のいずれでも良い。

- 1) 接触面に垂直な方向の並進力成分だけを検出するセンサ
- 2) 接触面に垂直な方向の並進力成分だけでなく接触面に垂直な方向以外の並進力成分も検出するセンサ
- 3) 分布圧センサ
- 4) 並進力成分以外にモーメントも検出するセンサ（例えば6軸力センサ）

また、荷重を直接的に検出するものでなくとも、前記柔軟な部材の変形（ひずみ）を検出する変位センサを用いても良い。

【0312】

本実施の形態においては、上記2)を用いることとする。制御精度をより一層高めるためは、膝の床反力センサとして、3)または4)を用いれば良い。なお、膝の構造としては、本出願人が先に提案した特開2000-62760号公報に示すごとく、ばねを備えた膝の保護パッドに床反力センサを追加したものにしても良い。

【0313】

階層構造の各ノードを図62（ひざまずき時ノード配置）の図のように設定する。すなわち、右足平を第1ノードに、左足平を第2ノードに、右膝（右すねリンク）を第3ノードに、左膝（左すねリンク）を第4ノードに、右手を第5ノードに、左手を第6ノードに対応させると共に、第1ノードと第2ノードを子ノードとして持つ第12ノード、第3ノードと第4ノードを子ノードとして持つ第34ノード、第5ノードと第6ノードを子ノードとして持つ第56ノード、第12ノードと第34ノードを子ノードとして持つ第1234ノード、第1234ノードと第56ノードを子ノードとして持つ第123456ノードを設定した。なお、第123456ノード中心点は、図62の目標全床反力中心点Pに一致する。

【0314】

この実施形態のように、グループが3層以上になっている場合には、下位のグループを前記第1の実施形態（4脚ロボットの実施形態）の接地部位に、上位のグループを前記第1の実施形態のグループに対応させればよい。また、この実施形態のように、足平や手の平がある場合には、特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）の足平コンプライアンス制御の部分と同様の処理を行えばよい。

【0315】

図63（ひざまずき用コンプライアンス動作決定部）に、コンプライアンス動作決定部の機能ブロック図を示す。

【0316】

補償全床反力モーメント分配器は、第1から第3までの実施の形態と異なり、目標第 n 接地部位床反力中心点（ $n=1, 2, 5, 6$ ）まわりの要求床反力モーメントも決定する。第 n ノード補償角決定部（ $n=1, 2, 5, 6$ ）は、特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）の足平補償角決定部と同様の処理を行なう。

【0317】

床形状推定器における接地部位床傾斜 θ_{fn} （ $n=1, 2, 5, 6$ ）を推定する処理は、特開平10-277969号公報（複合コンプライアンス制御）の床形状推定器の足平床傾斜を推定する処理と同様の処理を行なう。

【0318】

図2（全体機能ブロック図）におけるロボット逆キネマティクス演算部は、後述するように、第1から第3までの実施の形態と異なる。これらの相違点を除けば、第1から第3までの実施の形態と同様である。

【0319】

本ロボットにおいては、上体から膝に至るまでの関節の自由度の数が3しかない（腰に3自由度あるだけなので）、厳密に上体位置姿勢と足平位置姿勢と左右の膝の水平位置と左右の膝の高さの和とを維持したまま、左右の膝の高さの差だけを変えることはできない。言い換えると、強引に左右の膝の高さの差だけを変えようとする、接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じてしまう。

【0320】

同様に、厳密に上体位置姿勢と両膝の位置と両足平の水平位置と左右の足平の高さの和とを維持したまま、左右の足平の高さの差だけを変えることはできない。言い換えると、強引に左右の足平の高さの差だけを変えようとする、接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じてしまう。

【0321】

同様に、本ロボットにおいては、上体から膝に至るまでの関節の自由度の数が3しかない（腰に3自由度あるだけなので）、厳密に上体位置姿勢と足平位置姿勢と左右の膝の水平位置と左右の膝の高さの差とを維持したまま、左右の膝の高さの和だけを変えることはできない。言い換えると、強引に左右の膝の高さの和だけを変えようとする、接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じることはなくとも、上体位置がずれ、ロボット全体の重心位置と慣性力が目標値からずれ、安定性が低下する。

【0322】

すなわち、いずれにせよ、階層型コンプライアンス動作決定部において決定された機構変形補償付き修正目標接地部位位置姿勢と目標上体位置姿勢を同時に厳密に満足することはできないので、床との間でこじりあるいは滑りが生じたり、ロボット全体の重心位置と慣性力が目標値からずれ、安定性が低下したりする。

【0323】

そこで、本実施の形態においては、接地部位（すなわち膝および足平）と床との間で極力こじりあるいは滑りが生じず、かつ上体の重心位置が極力変わらないようにしつつ、左右の膝の高さの差の変化に応じて上体の姿勢を修正することとする。

【0324】

図 6 4 (上体体幹軸まわり回転を許容したコンプライアンス動作の図) に、その動作を示す。すなわち、左上図の状態から、右上図のように、おおよそ上体の重心を通る体幹軸を回転軸として、上体を回転させるようにする。

【0325】

図 6 4 のような膝付き姿勢においては、左右の足平の高さの差の変化によって、左右の膝の高さの差はおおよそ左右の足平の高さの差の変化の半分だけ変化する。そこで、左右の足平の高さの差の変化に応じて、左右の膝の高さの差の変化に応じた上体の姿勢修正と同様の動作を、左右の足平の高さの差の変化の場合に較べて半分の量だけ行なうようにする。

【0326】

また、接地部位 (すなわち膝および足平) と床との間で極力こじりあるいは滑りが生じず、かつ上体の重心位置が極力変わらないようにしつつ、左右の膝の高さの和の変化に応じて上体の位置と姿勢を修正することとする。

【0327】

図 6 5 (両膝を下げる時の上体位置姿勢修正の図) に、その動作を示す。すなわち、点線の姿勢から、実線の姿勢のように、両膝を下げる動作に伴い、上体の下端部 (あるいは腰部) を前にずらし、上体の傾きを後ろにずらすようにする。すなわち、上体重心位置 (あるいは上体の所定の位置) を維持しつつ上体を後ろに傾けるようにする。あるいは、逆に、両膝を上げる動作に伴い、上体の下端部 (あるいは腰部) を後ろにずらし、上体の傾きを前にずらすようにする。すなわち、上体重心位置 (あるいは上体の所定の位置) を維持しつつ上体を前に傾けるようにする。

【0328】

本実施形態における逆キネマティクス演算部を図 6 6 (ひざまずき用逆キネマティクス演算部) に示す。図示していないが、膝付き動作を生成する歩容生成器は、想定した床面上で足平と手の平と膝が歩容に対する要求通りに接地するように、目標足平位置姿勢 (目標第 1、2 接地部位位置姿勢) と目標手の平位置姿勢 (目標第 5、6 接地部位位置姿勢) と膝の位置 (目標第 3、4 接地部位位置) を優先的に決定し、次いで目標 ZMP を目標接地点 (線、面) を含む最小凸多角形である支持多角形内に決定し、次いで、目標上体位置姿勢を、目標足平位置姿勢と目標手の平位置姿勢と膝の位置と目標 ZMP を満足するように決定する。

【0329】

逆キネマティクス演算部では、まず、機構変形補償入り修正目標第 n 接地部位位置姿勢 ($n=1, 2, \dots$) および目標上体位置姿勢を基に、目標姿勢からの左右の膝の高さの差の修正量 $Z_{diffmddf}$ および目標姿勢からの左右の膝の高さの和の修正量 $Z_{summddf}$ を求める。

【0330】

具体的には、以下の式によって、左右の膝の高さの差の修正量 $Z_{kneediffmddf}$ 、左右の膝の高さの和の修正量 $Z_{kneesummddf}$ 、左右の足平の高さの差の修正量 $Z_{footdiffmddf}$ を求める。

$Z_{kneediffmddf}$

= 機構変形補償入り修正目標第 4 接地部位位置
 - 目標第 4 接地部位位置
 - 機構変形補償入り修正目標第 3 接地部位位置
 + 目標第 3 接地部位位置

…式 4 7

$Z_{kneesummddf}$

= 機構変形補償入り修正目標第 4 接地部位位置
 - 目標第 4 接地部位位置
 + 機構変形補償入り修正目標第 3 接地部位位置
 - 目標第 3 接地部位位置

…式 4 8

Zfootdiffmddf

= 機機構変形補償入り修正目標第2接地部位位置

- 目標第2接地部位位置

- 機機構変形補償入り修正目標第1接地部位位置

+ 目標第1接地部位位置

…式 49

なお、式 47～49 の「部位位置」はより正確には、その「部位位置」の高さ成分（鉛直方向成分）である。

【0331】

次いで、左右の膝の高さの差の修正量 Zkneediffmddf、左右の膝の高さの和の修正量 Zkneesummddf および左右の足平の高さの差の修正量 Zfootdiffmddf を基に、上体位置姿勢修正量を求める。

【0332】

上体位置姿勢修正量は、膝高さ差用上体位置修正量 Xbkneediffmddf、膝高さ差用上体姿勢修正量 θ bkneediffmddf、膝高さ差用上体位置修正量 Xbkneediffmddf、膝高さ差用上体姿勢修正量 θ bkneediffmddf および足平高さ差用上体位置修正量 Xbfootdiffmddf、足平高さ差用上体姿勢修正量 θ bfootdiffmddf から成る。具体的にこれらの値は次のように求められる。

【0333】

まず、左右の膝の高さの差の修正量 Zkneediffmddf に応じて、これによって接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じないための、膝高さ差用上体位置修正量 Xbkneediffmddf と膝高さ差用上体姿勢修正量 θ bkneediffmddf を、左右の膝の高さの差の修正量 Zkneediffmddf とその瞬間における目標姿勢を基に幾何学演算によって求める。

【0334】

より具体的には、例えば、次式によって、Xbkneediffmddf と θ bkneediffmddf を求める。ただし、Kxkneediff と Kthkneediff は、目標姿勢に応じた比例係数である。

$$Xbkneediffmddf = Kxkneediff * Zkneediffmddf$$

$$\theta bkneediffmddf = Kthkneediff * Zkneediffmddf$$

…式 50

これ以外にも、あらかじめ、いくつかの代表的な目標姿勢に対して、左右の膝の高さの差の修正量（あるいは第34ノード補償角）と上体姿勢修正量の関係求めておいて、これをマップあるいは関数として記憶し、これと左右の膝の高さの差の修正量 Zkneediffmddf を基に Xbkneediffmddf と θ bkneediffmddf を求めても良い。なお、体幹軸まわり回転させて上体姿勢を修正する場合には、膝高さ差用上体位置修正量 Xbkneediffmddf は 0 で良い。

【0335】

次いで、同様に、左右の足平の高さの差の修正量 Zfootdiffmddf に応じて、これによって接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じないための、足平高さ差用上体位置修正量 Xbfootdiffmddf と足平高さ差用上体姿勢修正量 θ bfootdiffmddf を、左右の足平の高さの差の修正量 Zfootdiffmddf とその瞬間における目標姿勢を基に幾何学演算によって求める。

【0336】

より具体的には、例えば、次式によって、Xbfootdiffmddf と θ bfootdiffmddf を求める。ただし、Kxfootdiff と Kthfootdiff は、目標姿勢に応じた比例係数であり、前述したように足平の高さ差の影響は膝の高さの差の影響のほぼ半分であることから、それぞれ、Kxkneediff と Kthkneediff の 2 分の 1 とする。

$$Xbfootdiffmddf = Kxfootdiff * Zfootdiffmddf$$

$$\theta bfootdiffmddf = Kthfootdiff * Zfootdiffmddf$$

…式 5 1

次いで、同様に、左右の膝の高さの和の修正量 $Zsummddf$ に応じて、これによって接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じないための、膝高さを用上体位置修正量 $Xbsummddf$ と膝高さを用上体姿勢修正量 $\theta bsummddf$ を、左右の膝の高さの和の修正量 $Zsummddf$ とその瞬間における目標姿勢を基に幾何学演算によって求める。

【0337】

これ以外にも、あらかじめ、いくつかの代表的な目標姿勢に対して、左右の膝の高さの和の修正量と上体姿勢修正量の関係を求めておいて、これをマップあるいは関数として記憶し、これと左右の膝の高さの和の修正量 $Zsummddf$ を基に $Xbsummddf$ と $\theta bsummddf$ を求めても良い。なお、後述するように体幹軸まわり回転させて上体姿勢を修正する場合には、膝高さを用上体位置修正量 $Xbsummddf$ は0で良い。

【0338】

なお、左右の膝の高さの差を、その差を生じさせる第34ノード補償角に換算し、左右の膝の高さの和を、その和を生じさせる第1234ノード補償角に換算し、左右の足平の高さの差を、その差を生じさせる第12ノード補償角に換算し、換算された補償角を基に、

幾何学演算によって上体位置姿勢修正量を決定するようにしても良い。あるいは、あらかじめ、いくつかの代表的な目標姿勢に対して、換算された補償角と上体位置姿勢修正量の関係を求めておいて、これをマップあるいは関数として記憶し、これと換算された補償角を基に、上体位置姿勢修正量を決定するようにしても良い。

【0339】

次いで、目標上体位置姿勢を上体位置姿勢修正量だけ回転移動して、こじり補正入り目標上体位置姿勢を求める。具体的には、体幹軸（あるいは所定の回転軸）まわりに目標上体を膝高さ差を用上体姿勢修正量と足平高さ差を用上体姿勢修正量との和（ $\theta bkneediffmddf + \theta bfootdiffmddf$ ）だけ回転移動し、さらにこれを左右軸まわりに膝高さ差を用上体姿勢修正量 $\theta bfootsummddf$ だけ回転移動し、さらにこれを前方に膝高さ差を用上体位置修正量と膝高さ差を用上体位置修正量と足平高さ差を用上体位置修正量の和（ $Xbkneediffmddf + Xbfootdiffmddf$ ）だけ移動して、こじり補正入り目標上体位置姿勢を求める。

【0340】

次いで、こじり補正入り目標上体位置姿勢と目標第n接地部位位置姿勢（目標足平位置姿勢）を基に、関節変位指令を求める。

【0341】

以上のごとく逆キネマティクス演算部の処理が実行される。すなわち、幾何学的に位置姿勢の修正動作に自由度が不足している場合には、上体位置あるいは上体を含む複数部位の重み付き平均位置（重みが各部位の質量比となっていることが望ましい）と目標全床反力中心点（目標ZMP）とを結ぶ線と、所定の複数の接地部位を含む線あるいは面との相対角度が所望の角度に変更されるように、目標接地部位と目標上体位置姿勢を共に修正するようにした。

【0342】

すなわち、幾何学的に位置姿勢の修正動作に自由度が不足している場合には、階層型コンプライアンス動作によって目標接地部位を修正するだけでなく、上体位置あるいは上体を含む複数部位の重み付き平均位置（重みが各部位の質量比となっていることが望ましい）を保持するように、あるいは、これと目標全床反力中心点（目標ZMP）を結ぶ線の角度を保持するように、目標上体位置姿勢も修正するようにした。

【0343】

すなわち、ロボット全体の姿勢制御安定性を高めるために、目標全床反力中心点（目標ZMP）まわりに発生する実床反力モーメントの制御性を優先し、ある所定の接地部位A（ここでは膝）の相対高さまたは角度である、あるいはある所定の接地部位Aを子孫ノ

ドとして持つノードの相対高さまたは角度である補償高さおよびまたは補償角度を決定する手段、前記補償高さおよびまたは補償角度に応じて、上体位置あるいは上体を含む複数部位の重み付き平均位置を概ね保持しつつ、少なくとも上体の姿勢または位置の修正量を決定する手段、および前記所定の接地部位Aを除く所定の接地部位Bの位置およびまたは姿勢と、前記修正量によって修正した上体位置姿勢とに基づいて、関節変位を決定する逆キネマティクス演算手段を備えるようにした。

体幹軸まわりに回転させる代わりに、図64（上体体幹軸まわり回転を許容したコンプライアンス動作の図）の右下図のように、鉛直軸を回転軸として、腰を中心に上体を回転させるようにしても良い。ただし、上体重心位置の左右方向へのずれが大きくなる。あるいは、体幹軸と鉛直軸の中間的な軸を回転軸としても良い。あるいは上体の位置と姿勢を同時に修正しても良い。また、姿勢回転と共に、上体位置（上体代表点の位置）を修正しても良い。また、上体重心位置が変わらないようにする代わりに、ロボットの全体重心位置あるいは上体の代表点位置が変わらないように上体の位置姿勢を修正しても良い。また、上体の位置およびまたは姿勢を修正する代わりに、上体以外の所定の部位の位置およびまたは姿勢を変えるようにしても良い。

〔膝付き姿勢におけるコンプライアンス制御における別手段について〕

次いで、この発明の第7の実施形態に係る脚式移動ロボットのコンプライアンス制御装置を説明する。

【0344】

第6の実施形態においては、こじりや滑りを防止し、かつロボットの全体重心位置と慣性力がずれないようにするために、上体位置姿勢を修正するようにしたが、本実施の形態においては、こじりや滑りをある程度までは許容し、優先的にロボットの全体重心位置と慣性力がずれないように、関節変位（股関節と膝関節の変位）あるいは接地部位位置姿勢を修正するようにした。

【0345】

すなわち、本実施の形態においては、逆キネマティクス演算部は、図67（別手法によるひざまずき用逆キネマティクス演算部）のようにした。この相違点を除けば、第6の実施の形態と同様である。

【0346】

本実施の形態の逆キネマティクス演算部を図41（別手法によるひざまずき用逆キネマティクス演算部）を用いて説明すると、まず、各機構変形補償入り修正目標接地部位位置と各目標接地部位位置を基に、前記式47、式48および式49にしたがって、左右の膝の高さの差の修正量 $Z_{kneediffmfd}$ 、左右の膝の高さの和の修正量 $Z_{kneesummdfd}$ 、左右の足平の高さの差の修正量 $Z_{footdiffmfd}$ を求め、さらに、左右の膝の高さの差を、その差を生じさせる第34ノード補償角 θ_{34} に換算し、左右の膝の高さの和を、その和を生じさせる第1234ノード補償角 θ_{1234} に換算し、左右の足平の高さの差を、その差を生じさせる第12ノード補償角 θ_{12} に換算する。

【0347】

次いで、目標換算された各ノード補償角を基に、関節変位修正量を決定する。まず、目標歩容の上体位置姿勢を固定したまま、関節変位を関節変位修正量だけ修正した場合に、目標全床反力中心点（目標第123456ノード床反力中心点（図62の点P））とロボット全体重心（あるいは、上体重心、あるいは、上体を含む複数の部位の重心）を結ぶ線分の角度が変わらないようにしつつ、接地部位に対応した任意の第 n ノードの傾斜角度（補償角）が単位摂動量になるための第 j 関節変位修正量（ $j=1, 2, \dots$ ）を求め、これを第 n ノード補償角に対する第 j 関節変位の感度 $L_{n,j}$ とする。

【0348】

より一般的には、目標歩容の関節変位を関節変位修正量だけ修正した場合に、目標全床反力中心点（目標第123456ノード床反力中心点）とロボット全体重心（あるいは、上体重心、あるいは、上体を含む複数の部位の重心）を結ぶ線分と、接地部位に対応した任意の第 n ノードの傾斜角度との間の相対角度が単位摂動量になるための第 j 関節変位修

正量 ($j=1,2,\dots$) を求め、これを第 n ノード補償角に対する第 j 関節変位の感度 Ln_j とする。

【0349】

具体的には、 Ln_knee_r を第 n 補償角に対する右膝関節変位の感度、 Ln_knee_l を第 n 補償角に対する左膝関節変位の感度、 Ln_hip_r を第 n 補償角に対する右股ピッチ関節変位の感度、 Ln_hip_l を第 n 補償角に対する左股ピッチ関節変位の感度とすると、図 59 に示す膝付き姿勢においては、各感度は次のように設定する。

$L1234_hip_r = 0$
 $L1234_hip_l = 0$
 $L1234_knee_r = 1$
 $L1234_knee_l = 1$
 $L12_hip_r = 0$
 $L12_hip_l = 0$
 $L12_knee_r = a12$
 $L12_knee_l = -a12$
 $L34_hip_r = a34$
 $L34_hip_l = -a34$
 $L34_knee_r = 0$
 $L34_knee_l = 0$

…式 5 2

ただし、 $a12$ 、 $a34$ は所定の定数である。

【0350】

次いで、次式により各関節変位修正量を決定する。ただし、 $\theta knee_r$ は、右膝関節変位修正量、 $\theta knee_l$ は、左膝関節変位修正量、 θhip_r は、右股ピッチ関節変位修正量、 θhip_l は、左股ピッチ関節変位修正量とする。

$$\theta knee_r = L1234_knee_r * \theta 1234 + L12_knee_r * \theta 12 + L34_knee_r * \theta 34$$

…式 5 3

$$\theta knee_l = L1234_knee_l * \theta 1234 + L12_knee_l * \theta 12 + L34_knee_l * \theta 34$$

…式 5 4

$$\theta hip_r = L1234_hip_r * \theta 1234 + L12_hip_r * \theta 12 + L34_hip_r * \theta 34$$

…式 5 5

$$\theta hip_l = L1234_hip_l * \theta 1234 + L12_hip_l * \theta 12 + L34_hip_l * \theta 34$$

…式 5 6

なお、他の関節変位修正量も同様に求めるが、説明を容易にするために、ここでは省略する。

【0351】

すなわち、第 1 2 3 4 補償角に対しては、図 4 2 (別手法による足平下げ) に示すごとく両膝の変位を第 1 2 3 4 補償角と同量だけ修正する。また、第 1 2 補償角に対しては、右膝を第 1 2 補償角に比例して修正しつつ、左膝の変位を右膝の変位の修正量に -1 を乗じた量だけ修正する。つまり右膝の変位 (角度) を図 6 8 (別手法による足平下げ) に示すごとく修正し、左膝の変位 (角度) はその逆に修正する。また、第 3 4 補償角に対しては、右股ピッチ関節の変位 (角度) を第 3 4 補償角に比例して修正し、左股ピッチ関節の変位 (角度) を右股ピッチ関節の修正量に -1 を乗じた量だけ修正するようにした。つまり右股ピッチ関節の変位 (角度) を図 6 9 (別手法による膝下げ) に示すごとく修正し、左股ピッチ関節の変位 (角度) はその逆に修正する。

【0352】

このような関節変位修正により、目標全床反力中心点 (目標第 1 2 3 4 5 6 ノード床反力中心点) とロボット全体重心 (あるいは、上体重心、あるいは、上体を含む複数の部位の重心) を結ぶ線分と、接地部位に対応した任意の第 n ノードの傾斜角度との間の相対角

度が、前記換算された各ノード補償角だけ増加する。したがって、実床反力が忠実に制御され、姿勢安定性および接地性が向上する。

【0353】

関節変位指令（目標関節変位）を直接修正する代わりに、略同一の目標関節変位を生じさせる優先修正目標接地部位位置姿勢（具体的には、足平、手の平）を決定するようにし、決定された優先修正目標接地部位位置姿勢を基に逆キネマティクス演算によって関節変位指令を決定するようにしても良い。

【0354】

なお、関節の自由度不足のため、目標上体位置姿勢とすべての修正目標接地部位位置姿勢を満足するように逆キネマティクス演算によって関節変位を決定することはできないので、逆キネマティクス演算を行なうときには、すべての修正目標接地部位位置姿勢のうちの一部の修正目標接地部位位置姿勢を用いることとなる。前記一部の修正目標接地部位位置姿勢を優先目標修正接地部位位置姿勢と呼ぶ。

【0355】

たとえば、図68（別手法による足平下げ図）の状況においては、第1234ノード補償角に対しては、膝を中心として目標足平位置を回転移動させた位置を修正目標足平位置と決定すれば良い。

【0356】

なお、実施の形態の一例として、ひざまずき状況におけるコンプライアンス動作について説明したが、椅子に座った状況でのコンプライアンス動作に適応する場合には、次のようにすれば良い。

【0357】

すなわち、でん部には、図70（でん部の床反力センサの図）に示すように、左右にそれぞれ床反力を検出するセンサ（例えば6軸力センサ）を備える。または、左右別々のセンサを設ける代わりに、左右のでん部の合力を検出するひとつのセンサにしても良い。また、床反力センサの外側は、図70（でん部の床反力センサの図）に示すように、スポンジ等の柔軟な部材によって覆う。なお、でん部の接地部位におけるコンプライアンス制御の精度を良くするために、柔軟な部材によって覆うだけでなく、図70（でん部の床反力センサの図）に示すように、前記柔軟な部材の表面（接地部位）を丸く凸面状に作ると良い。特に、座った上体において床反力センサ検知位置と凸面の頂点の水平位置を一致させると良い。これらにより、修正動作と床反力の関係の非線形性が小さくなるので、制御特性が良くなる。

【0358】

また、図70（でん部の床反力センサの図）に示すように、胴体に、すなわち肩関節と腰関節の間に、胴体を旋回させる関節およびまたは屈曲させる関節があることが望ましい。

階層型コンプライアンスのためのノードと階層構造は、図71（腰掛け時ノード配置）のように設定すれば良い。なお、目標全床反力中心点Pは、実際の床面上ではなく、空中の仮想の床面上にある。これら以外は、ひざまずき状況でのコンプライアンス動作と同様である。

【0359】

[直接検出できない床反力の推定について]

床反力センサによって直接的に検出できない実ノード床反力は、床反力センサによって直接的に検出される他の実接地部位床反力、Gセンサ検出値、傾斜計検出値などを用いて、オブザーバを組むか、簡易的な代数関係によって求めれば良い。例えば、階層型コンプライアンス動作も目標全床反力中心点まわりに接地部位を回転させる回転型のコンプライアンス動作であるので、コンプライアンス動作を行なっても、ロボットの全体重心鉛直加速度（あるいは目標全床反力中心点と全体重心を結ぶ線分の方角の成分）は、目標動作（歩容）の全体重心鉛直加速度にほぼ一致する。したがって、すべての実接地部位床反力鉛

直成分の和は、目標動作（歩容）の全体重心鉛直加速度と重力加速度の和にロボット全体質量を乗じた値にほぼ一致する。

【0360】

よって、実第 n ノード床反力が直接的に検出できない場合、まず、実第 n ノードを先祖ノードに持たず、かつ、実第 n ノードそのものでないすべての葉ノードの実床反力（実接地部位床反力）の和（以降、これを実第 n ノード外床反力と呼ぶ）を求める。

【0361】

次いで、次式によって、実第 n ノード床反力の推定値である推定第 n ノード床反力を求める。

【0362】

$$\begin{aligned} \text{推定第 } n \text{ ノード床反力} &= \text{目標動作（歩容）の全体重心加速度} * \text{全体質量} \\ &- \text{実第 } n \text{ ノード外床反力} \end{aligned}$$

…式 57

上体などに加速度センサを備えている場合には、加速度センサおよび目標歩容（およびまたは実関節変位）によりロボット全体の重心加速度（以降、推定全体重心加速度と呼ぶ）を推定し、次式によって、実第 n ノード床反力の推定値である推定第 n ノード床反力を求めても良い。

$$\begin{aligned} \text{推定第 } n \text{ ノード床反力} &= (\text{推定全体重心加速度} + \text{重力加速度}) * \text{全体質量} \\ &- \text{実第 } n \text{ ノード外床反力} \end{aligned}$$

…式 58

例えば、第 6 の実施形態において、膝の床反力を検知する床反力センサが備わっていない場合、あるいは、膝の床反力を検知する床反力センサが故障した場合には、推定第 3 4 ノード床反力を次式によって求める。

【0363】

$$\begin{aligned} \text{推定第 } 3 \text{ 4 ノード床反力} &= (\text{目標動作（歩容）の全体重心加速度} + \text{重心加速度}) \\ &* \text{全体質量} \\ &- \text{実第 } 3 \text{ 4 ノード外床反力} \\ &= \text{目標動作（歩容）の全体重心加速度} * \text{全体質量} \\ &- (\text{実第 } 1 \text{ 2 ノード床反力} + \text{実第 } 5 \text{ 6 ノード床反力}) \end{aligned}$$

…式 59

さらに、推定第 3 4 ノード床反力を実第 3 4 ノード床反力に代わりに用いて、コンプライアンス動作処理によって第 1 2 3 4 ノード補償角 θ_{1234} を決定し、また床形状推定処理によって推定第 1 2 3 4 ノード相対床高さ偏差 $Z_{1234rel_estm}$ を推定する。

【0364】

第 3 4 ノード補償角 θ_{34} の決定では、想定した床通り（あるいは、第 3 ノード床高さ偏差 Z_{3rel_estm} と第 4 ノード床高さ偏差 Z_{4rel_estm} が共に推定第 1 2 3 4 ノード相対床高さ偏差 $Z_{1234rel_estm}$ に一致する）と仮定して、機構変形補償入り修正目標第 3 接地部位位置姿勢、機構変形補償入り修正目標第 4 接地部位位置姿勢と推定第 3 4 ノード床反力を基に、実第 3 ノード床反力の推定値である推定第 3 ノード床反力と実第 4 ノード床反力の推定値である推定第 4 ノード床反力とを求める。

【0365】

さらに、推定第 3 ノード床反力と推定第 4 ノード床反力を実第 3 ノード床反力と実第 4 ノード床反力の代わりに用いて、コンプライアンス動作処理によって第 3 4 ノード補償角 θ_{34} を決定する。

[コンプライアンス動作の変形例について]

復元要求モーメント（補償モーメント）を基に、目標ノード床反力中心点まわりの修正目標ノード床反力モーメントを決定する代わりに、復元要求モーメント（補償モーメント

）を基に、目標ノード床反力中心点を修正した修正目標ノード床反力中心点を決定しても良い。この場合、目標ノード床反力中心点まわりの目標ノード床反力モーメントは修正しないで0のままとする。

【0366】

また、第 n ノード床反力の中で制御できなかった成分（予想されるまたは検出された制御偏差成分）を補うために、この成分に応じて、第 n ノードの親ノードの目標床反力を修正しても良い。すなわち、実 n ノード床反力と第目標第 n ノード床反力との差の前回値あるいは前記差をローパスフィルタに通した値を第 n ノードの目標床反力に付加しても良い。

[床形状の表現構造の変形例について]

推定処理においては、コンプライアンス制御用のツリー構造と異なるツリー構造を与えても良い。2層だけでも良い。例えば、根と葉のみ。重みも変えても良い。空中期で重みが0であれば良い。

[床形状推定の変形例について]

また、前述の修正目標ノード床反力中心点に基づいて、各修正ノード重みを決定し、これを要素とするベクトルを、床形状推定に用いる重みとして用いても良い。

[センサの変形例について]

各点の相対床高さ偏差推定値を求める際に、床反力と床反力-変形モデルと姿勢センサ36から求める代わりに、コンプライアンス機構部の変形量を検出する変形量検出器を備えて、変形量検出器と姿勢センサ36から求めるようにしても良い。

[床形状を相対的に推定するだけでなく、グローバルに推定したい場合について]

1) 上体のグローバル高さを検知できる場合での床のグローバル高さの推定:

上体などロボットのある所定部位のグローバル高さを検出する検出器（加速度センサを用いた上体高さ推定装置（例えば本願出願人によるPCT/JP03/05448号に記載されている推定装置）あるいは視覚センサ等の外界センサなど）を用いる。推定された上体のグローバル高さと、関節変位（実関節変位あるいは目標関節変位）、上体傾斜検出値および実床反力検出値を基に、推定床高さ偏差のグローバル値を求める。従って、根ノードの推定床高さ偏差は、すべての接地部位のグローバルな推定床高さ偏差の重み付き平均値としての意味を持つこととなる。

2) 上体のグローバル高さがわからない状況での床のグローバル高さの推定:

ある推定第 n 床高さ偏差のグローバル値（グループ内相対値ではなくグローバル座標系における偏差）がわかっているならば、それと推定各相対床高さ偏差を基に、すべての点の推定床高さ偏差のグローバル値を求める。歩行のスタート点での推定第 n 床高さ偏差のグローバル値がわかっているならば、歩行を続けることで、逐次新しく接地した床高さ偏差のグローバル値を求められるので、これを記憶することにより、歩行軌跡の床高さマップが作成される。

[床形状推定の変形例について]

前述の修正目標ノード床反力中心点に基づいて、各修正ノード重みを決定し、これを、床形状推定において、実第 n ノード相対床高さ等を定義するために用いる重みとしても良い。また、床形状推定において、実第 n ノード相対床高さ等を定義するために用いる重みは、目標床反力分配器が決定した前述の重みと必ずしも同一のものにする必要はない。補足すると、実第 n ノード相対床高さ等を定義するための重みは、目標床反力分配器が決定する重みに必ずしも一致させなくてはならない訳ではないが、一致させるならば、（この場合、自動的に、根ノードの目標床反力中心点は目標全床反力中心点に一致する、）コンプライアンス動作の第 n ノード補償角（ $n=1, 2, \dots$ ）に第 n ノード推定床傾斜偏差を付加するだけで、床形状偏差の影響を打ち消すことができるので、床形状偏差の影響を打ち消すための演算量を低減することができる。

【0367】

さらに、推定床形状偏差を床形状地図情報として記憶しておき、次回同一場所を歩行する時に、記憶しておいた床形状地図情報を基に目標歩容を生成するようにしても良い。

尚、上記した第1、第2の実施の形態において、ブロック線図は演算処理順序を変えるなどの等価変形をしても良い。

【0368】

また、本発明は、脚式移動ロボットに限らず、アクティブサスペンションを持つ車輪型移動体にも応用することができる。

【図面の簡単な説明】

【0369】

- 【図1】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図2】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図3】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図4】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図5】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図6】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図7】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図8】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図9】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図10】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図11】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図12】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図13】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図14】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図15】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図16】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図17】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図18】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図19】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図20】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図21】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図22】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図23】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図24】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図25】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図26】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図27】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図28】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図29】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図30】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図31】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図32】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図33】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図34】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図35】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図36】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図37】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図38】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図39】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図40】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図41】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図42】 本発明の実施形態の説明図。
- 【図43】 本発明の実施形態の説明図。

- 【図 4 4】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 4 5】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 4 6】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 4 7】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 4 8】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 4 9】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 0】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 1】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 2】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 3】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 4】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 5】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 6】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 7】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 8】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 5 9】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 0】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 1】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 2】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 3】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 4】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 5】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 6】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 7】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 8】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 6 9】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 7 0】本発明の実施形態の説明図。
- 【図 7 1】本発明の実施形態の説明図。

【符号の説明】

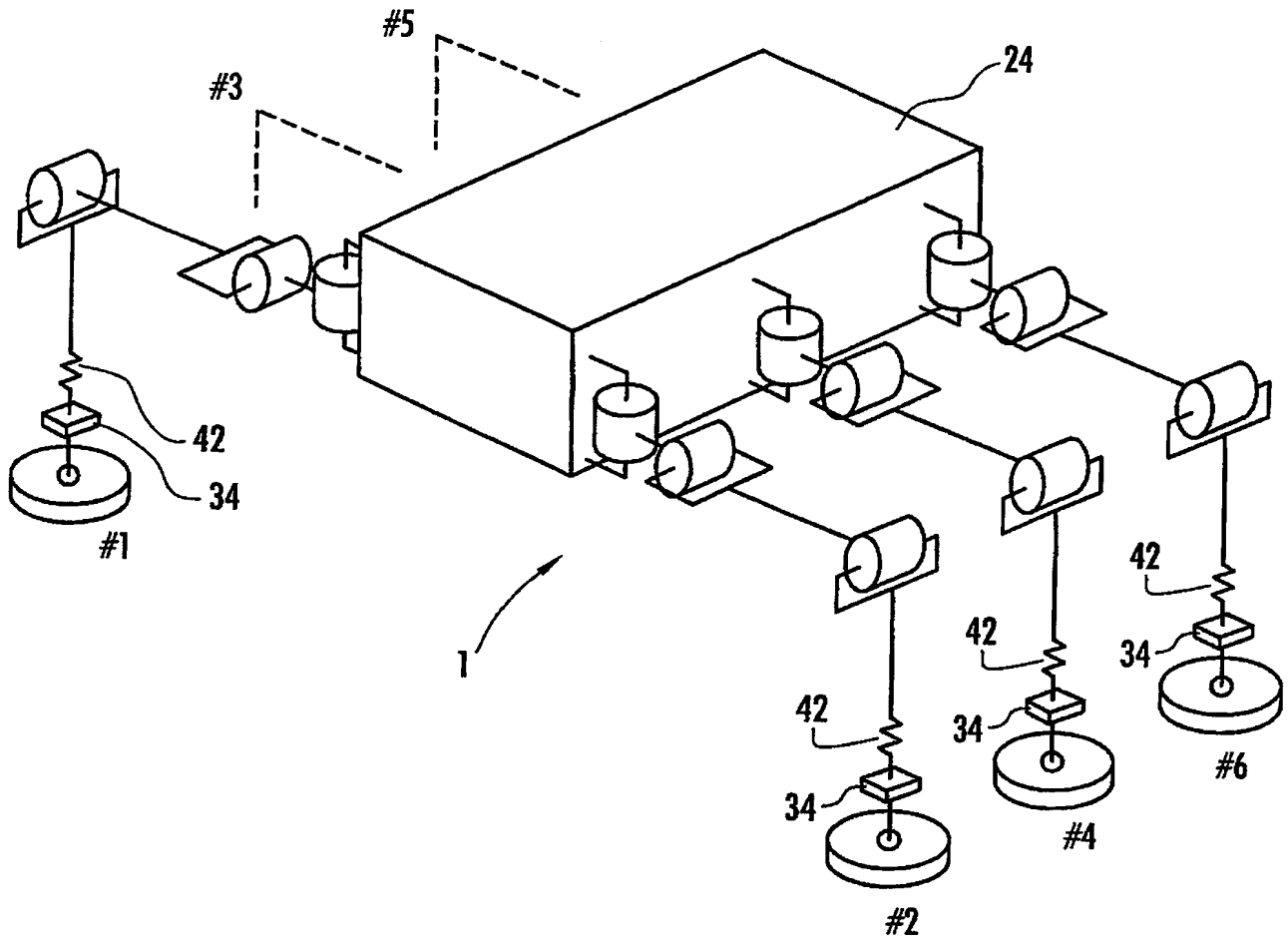
【0 3 7 0】

1…移動ロボット（移動体）、1 0 0…歩容生成装置、1 1 4…階層型コンプライアンス動作決定部、3 6…姿勢センサ、3 4…床反力センサ。

【書類名】 図面
【図 1】

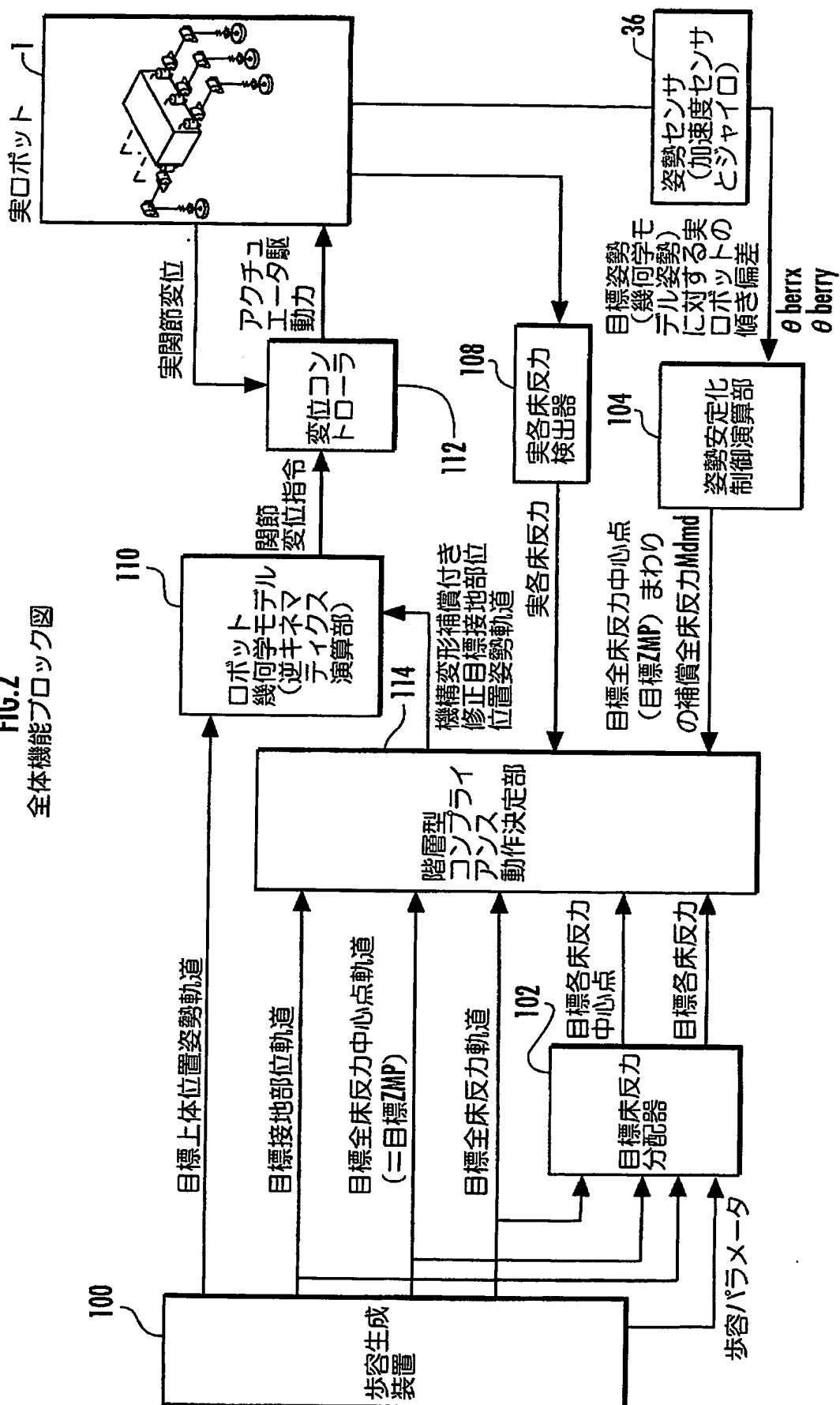
FIG.1

多脚ロボット全体外観図



【図 2】

FIG.2
全体機能ブロック図



【図 3】

FIG.3(a)

4脚ロボット脚先端軌跡と目標全反力中心点軌跡の図

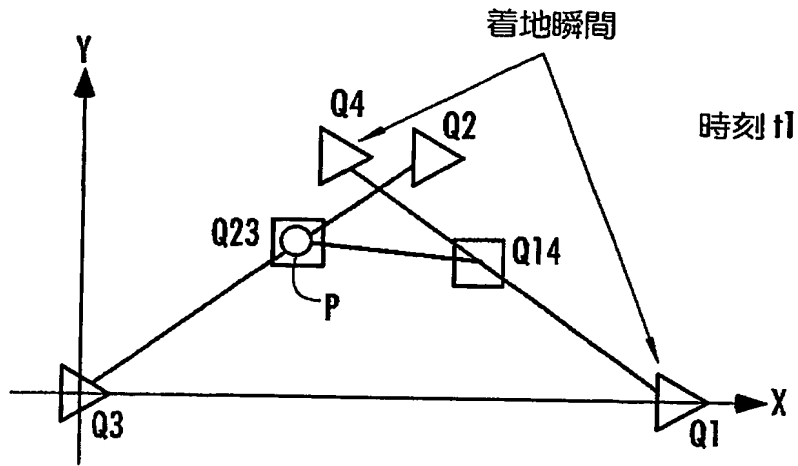


FIG.3(b)

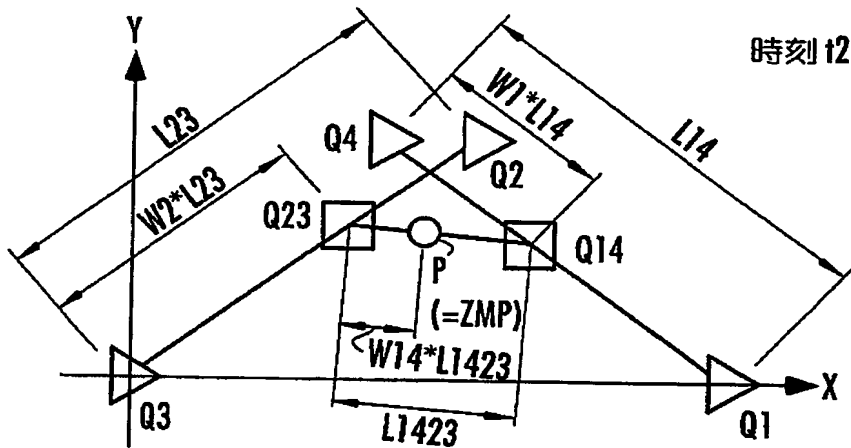
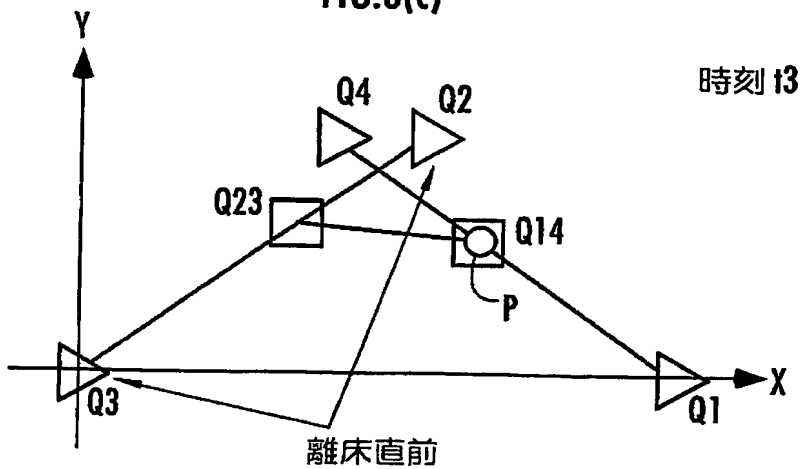


FIG.3(c)



【図 4】

FIG.4(a)

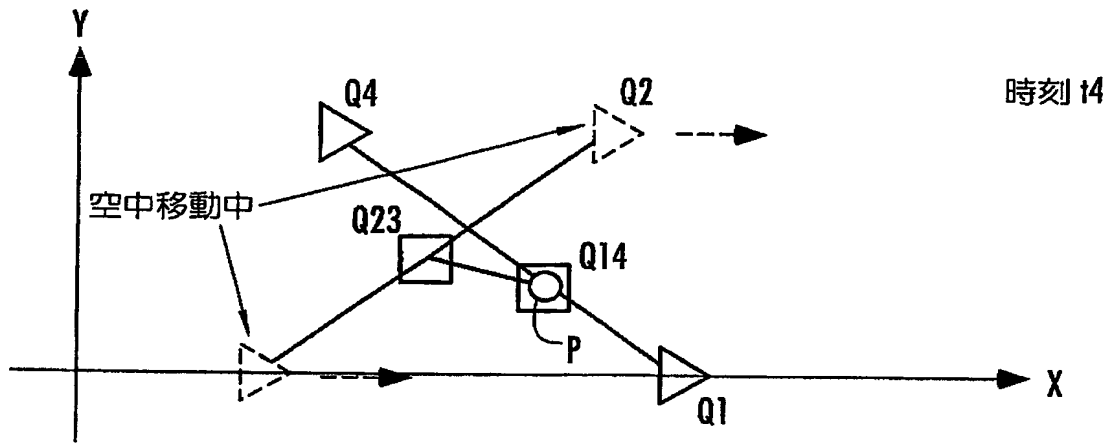


FIG.4(b)

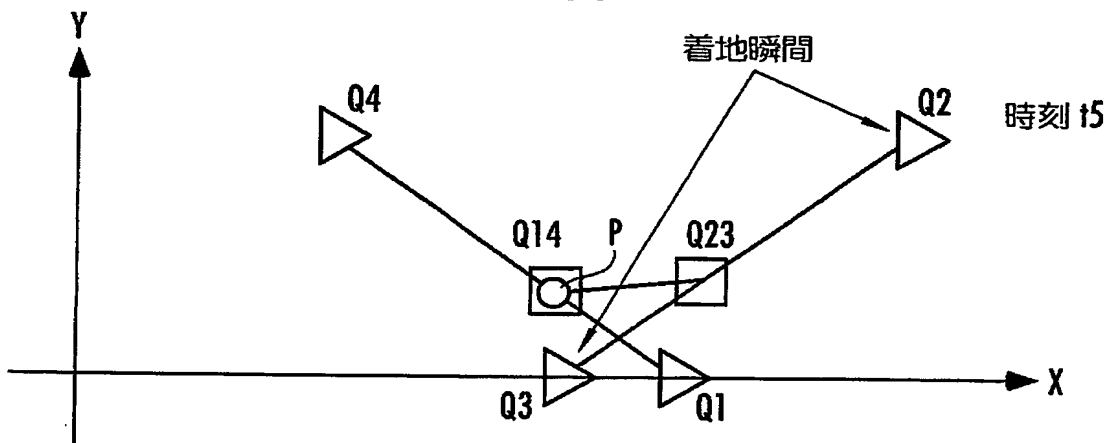
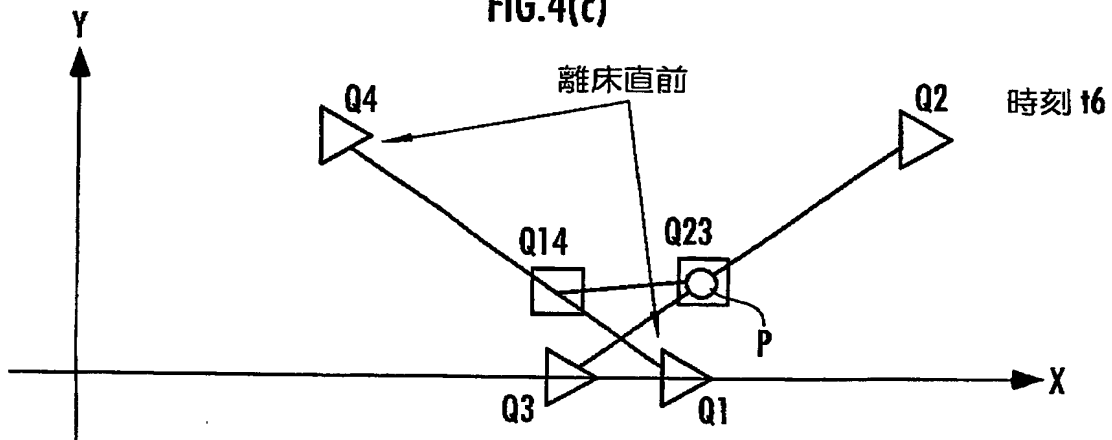


FIG.4(c)



【図 5】

FIG.5(a)

4脚ロボットの重みのタイムチャート

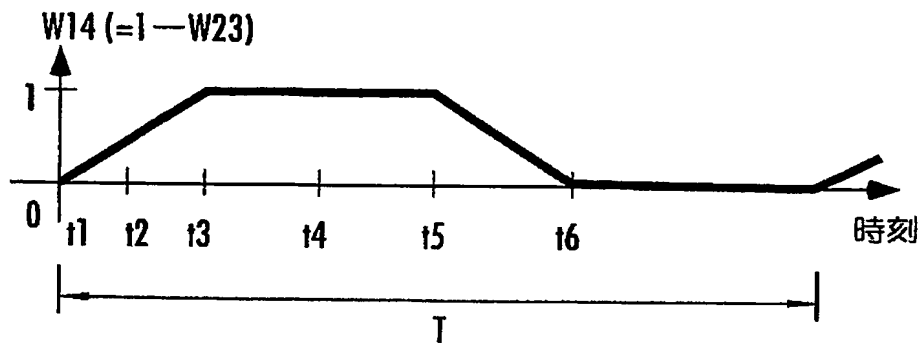


FIG.5(b)

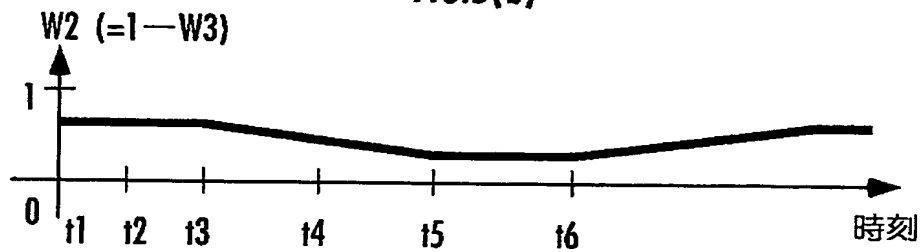


FIG.5(c)

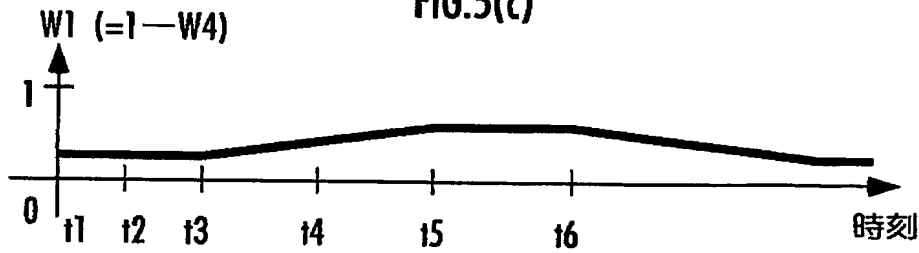
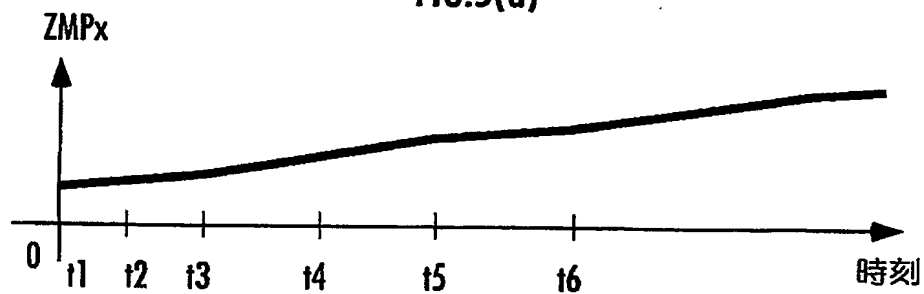
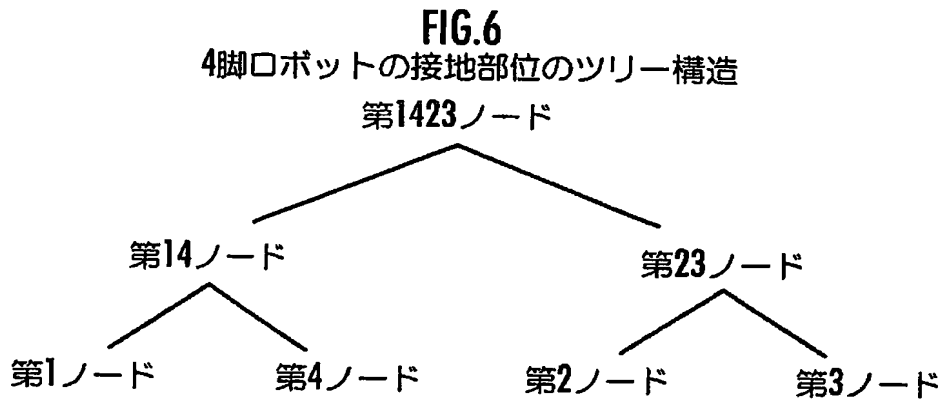


FIG.5(d)

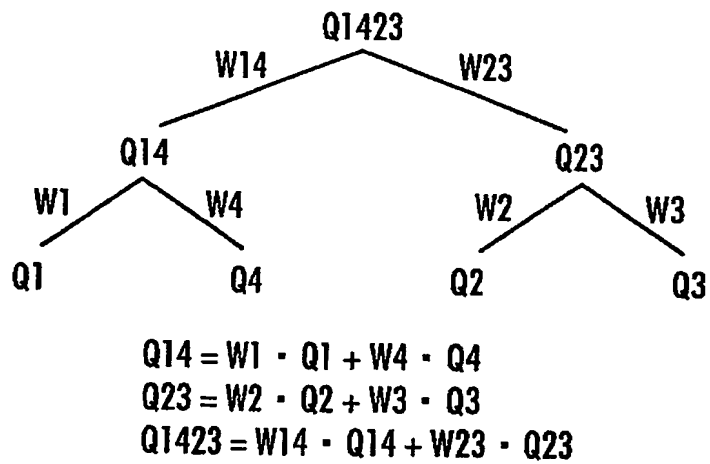


【図 6】

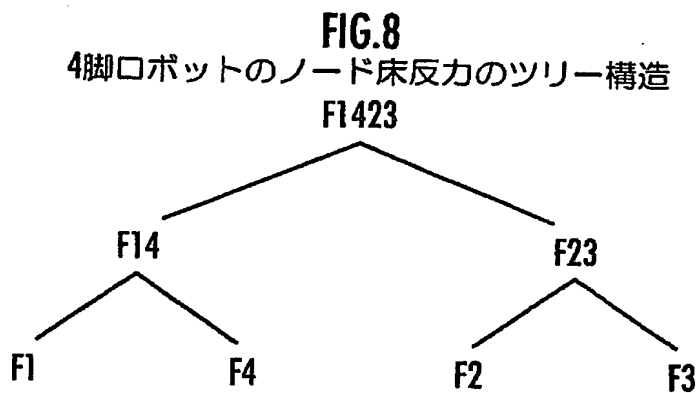


【図 7】

FIG.7
4脚ロボットのノード床反力中心点のツリー構造



【図 8】



$$F1 = W1 \cdot W14 \cdot F_{totalref}$$

$$F4 = W4 \cdot W14 \cdot F_{totalref}$$

$$F2 = W2 \cdot W23 \cdot F_{totalref}$$

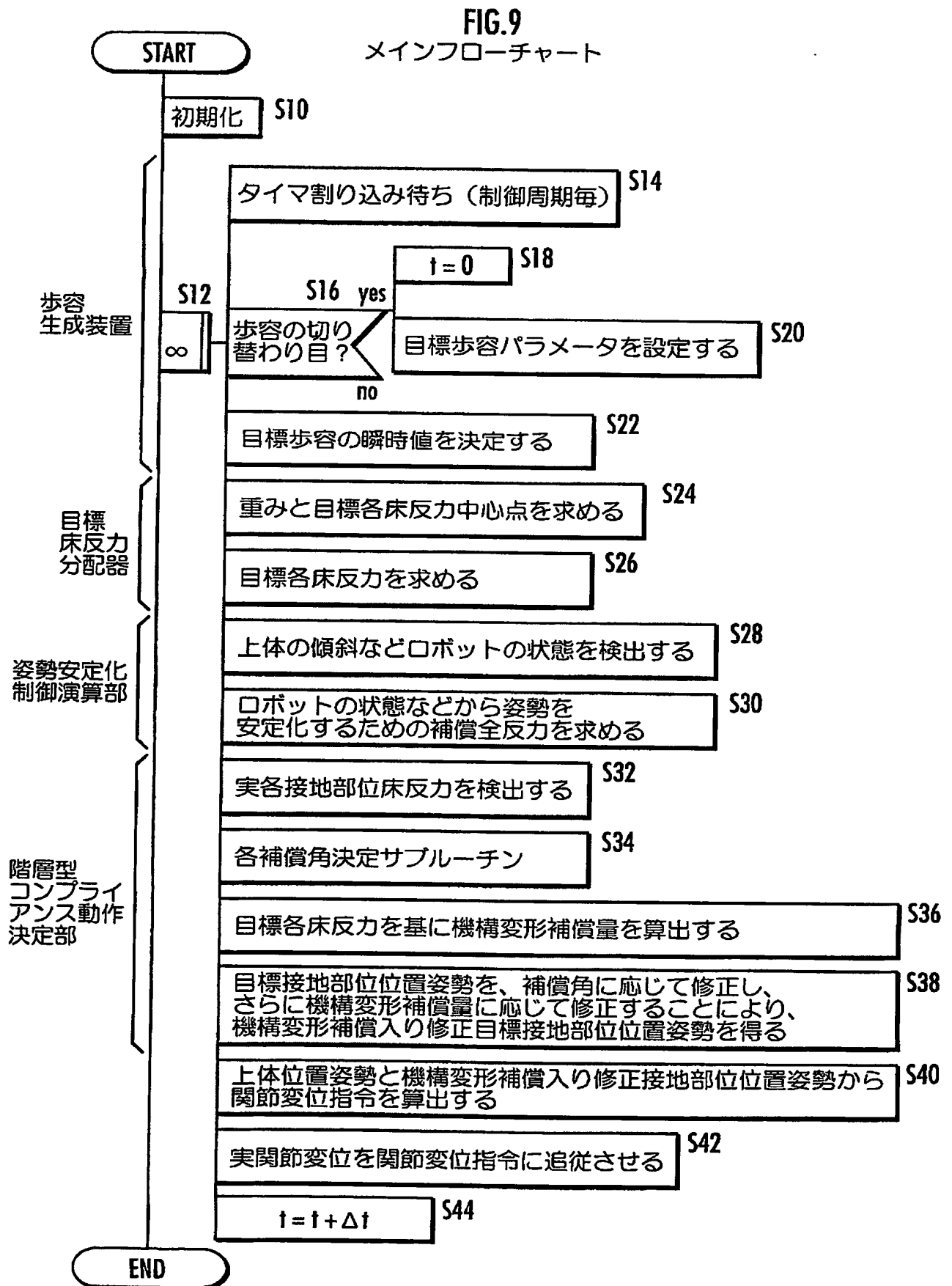
$$F3 = W3 \cdot W23 \cdot F_{totalref}$$

$$F14 = F1 + F4$$

$$F23 = F2 + F3$$

$$F1423 = F14 + F23$$

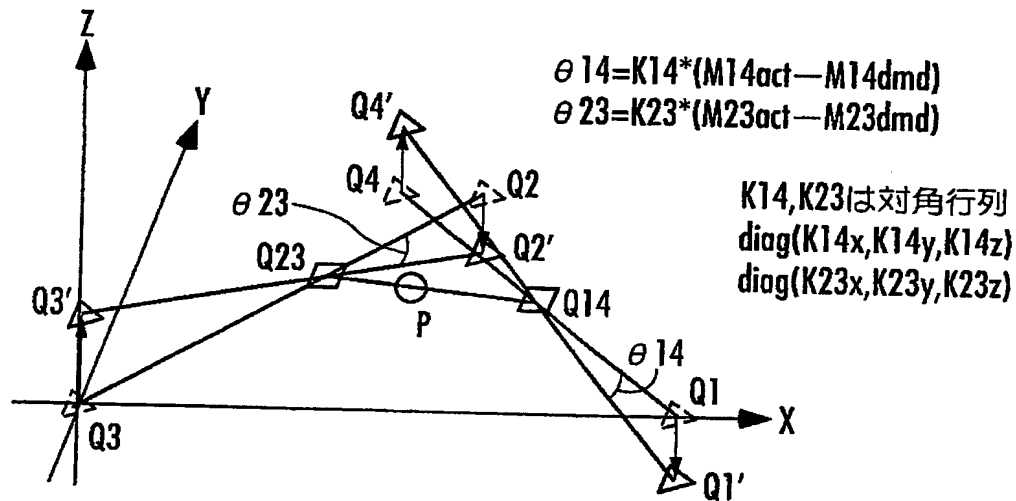
【図 9】



【図10】

FIG.10

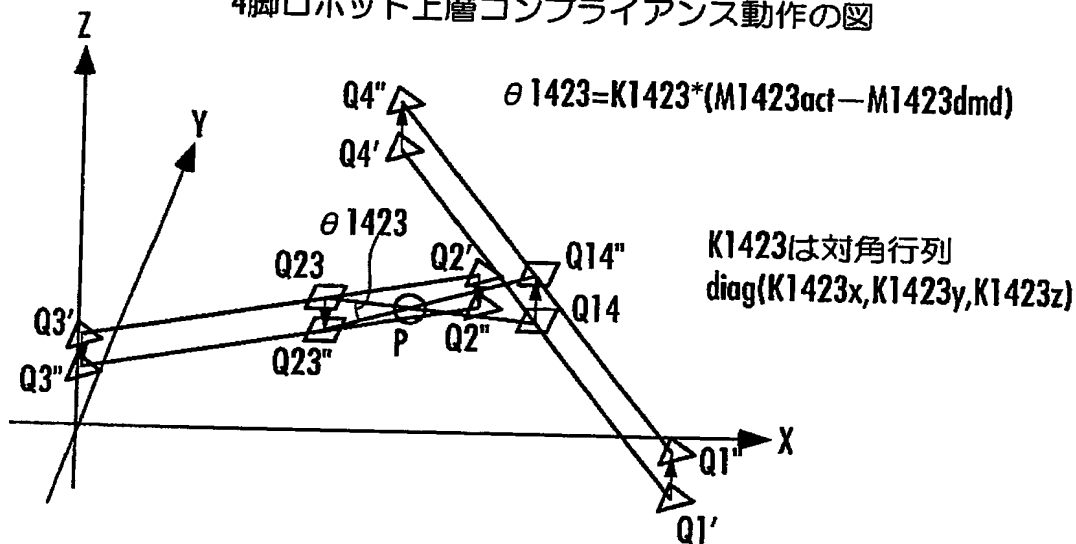
4脚ロボット下層コンプライアンス動作の図



【図11】

FIG.11

4脚ロボット上層コンプライアンス動作の図

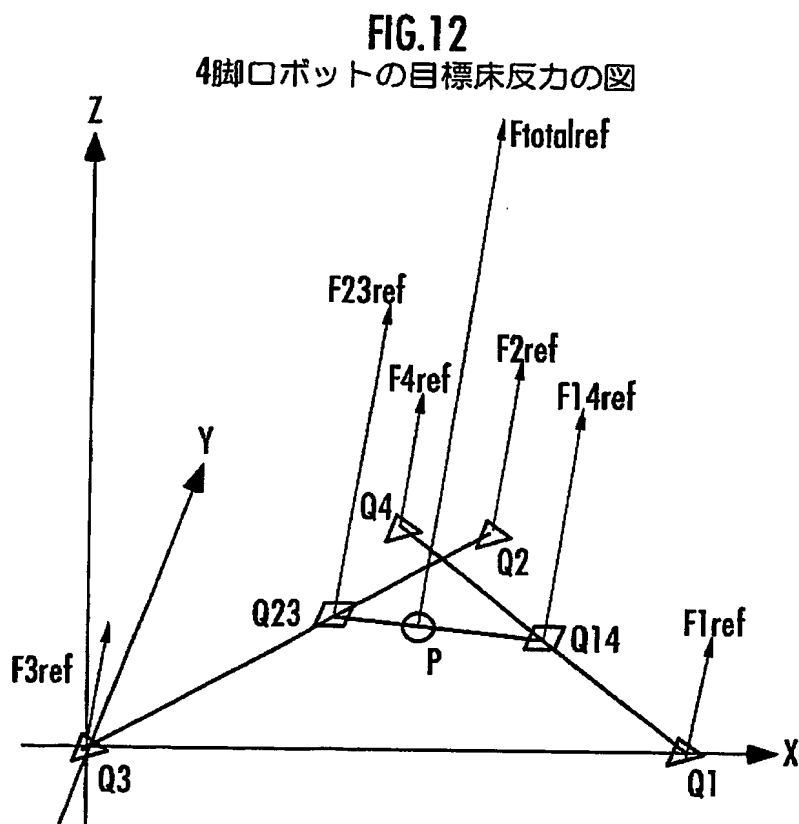


上式の代わりに、

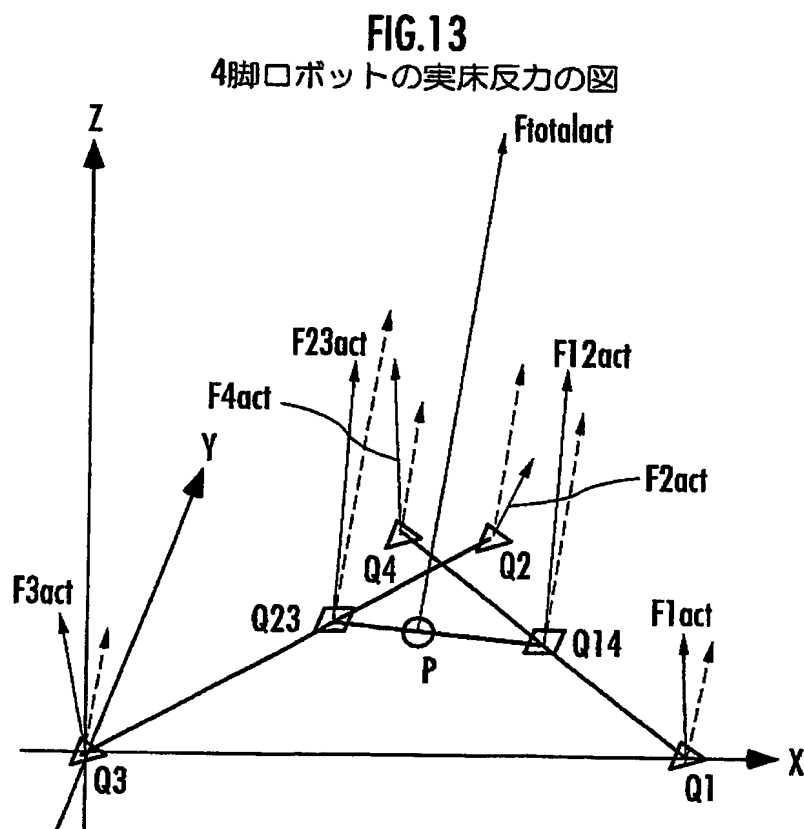
$$\theta 1423 = K1423 * (M1423act + M14act + M23act - M1423dmd)$$

を用いても良い。

【図 12】



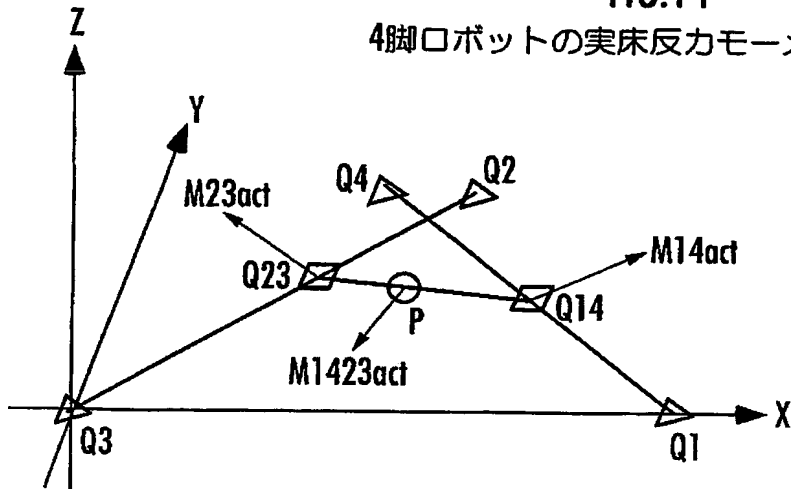
【図 13】



【図 14】

FIG.14

4脚ロボットの実床反力モーメントの図

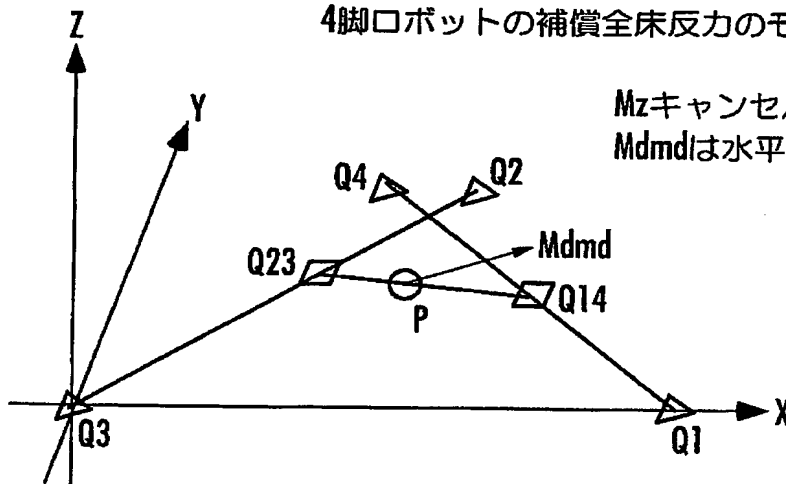


【図 15】

FIG.15

4脚ロボットの補償全床反力のモーメントの図

M_z キャンセルをしないならば、
 M_{dmd} は水平ベクトル。



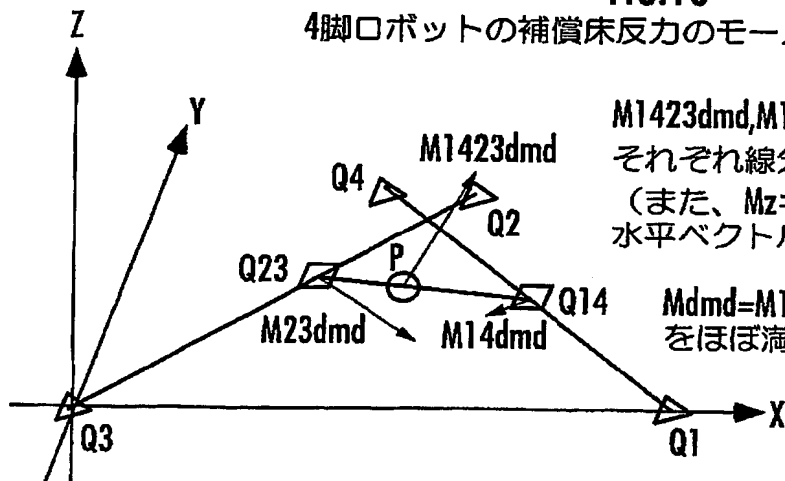
【図 16】

FIG.16

4脚ロボットの補償床反力のモーメント分配の図

$M_{1423dmd}$, M_{14dmd} および M_{23dmd} は、
 それぞれ線分 Q_1Q_2 , 線分 Q_1Q_4 , 線分 Q_2Q_3 に直交。
 (また、 M_z キャンセルをしないならば、
 水平ベクトル)

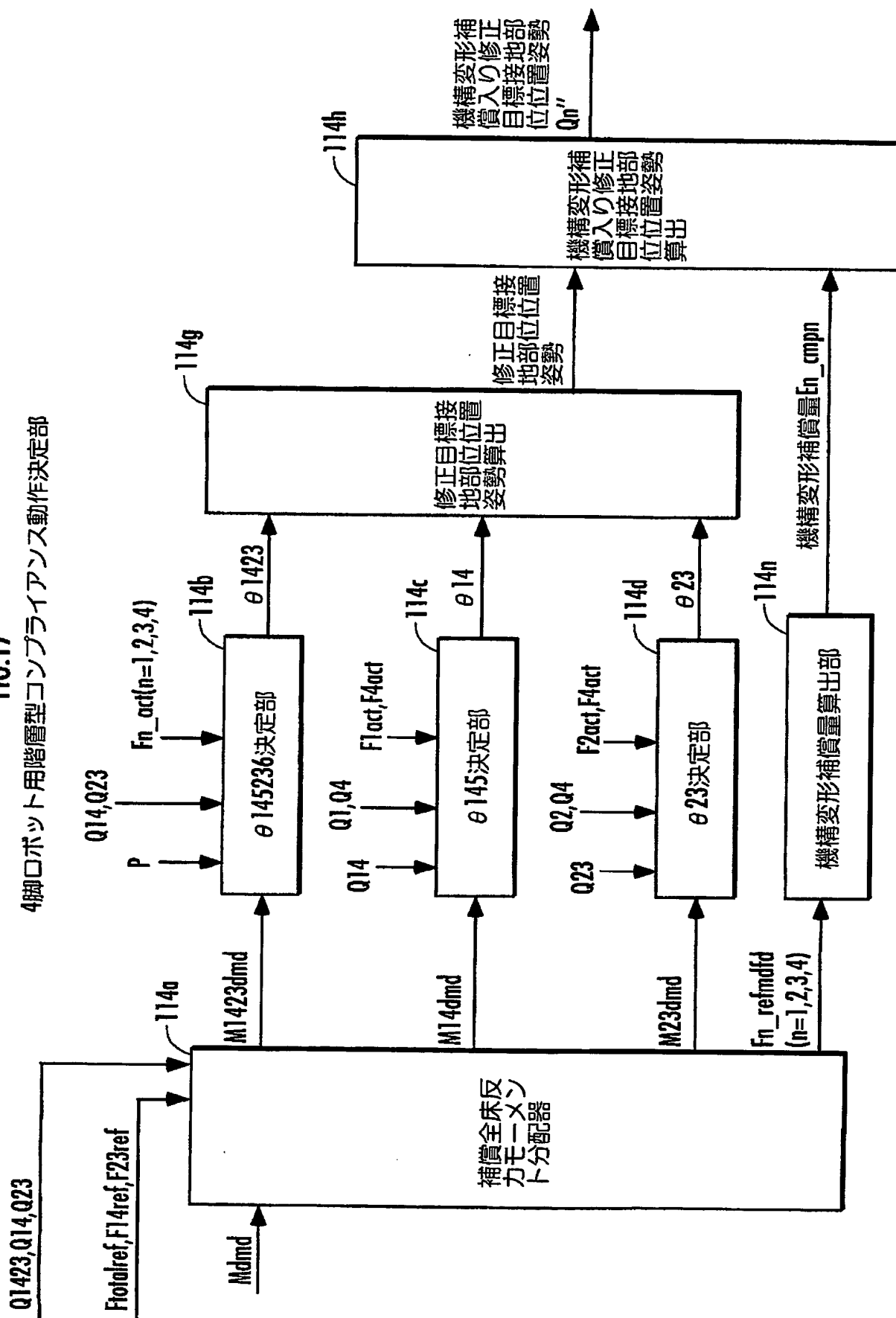
$M_{dmd} = M_{1423dmd} + M_{14dmd} + M_{23dmd}$
 をほぼ満足させる。



【図 17】

FIG.17

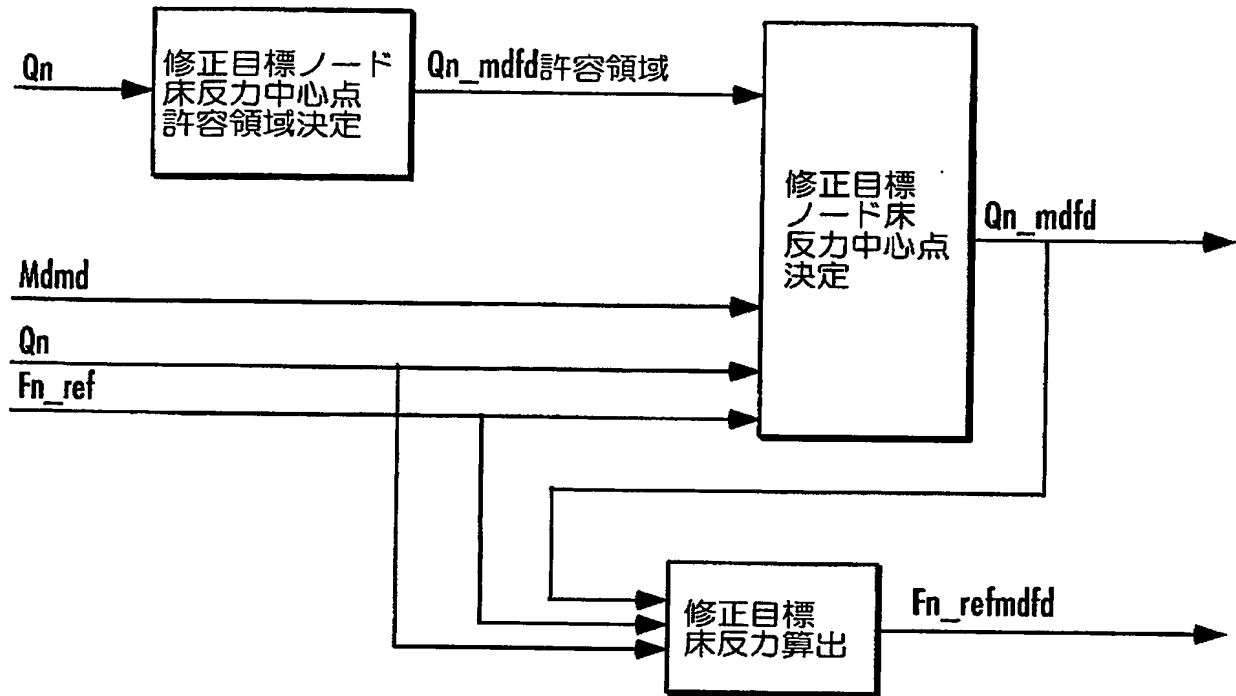
4脚ロボット用階層型コンプライアンス動作決定部



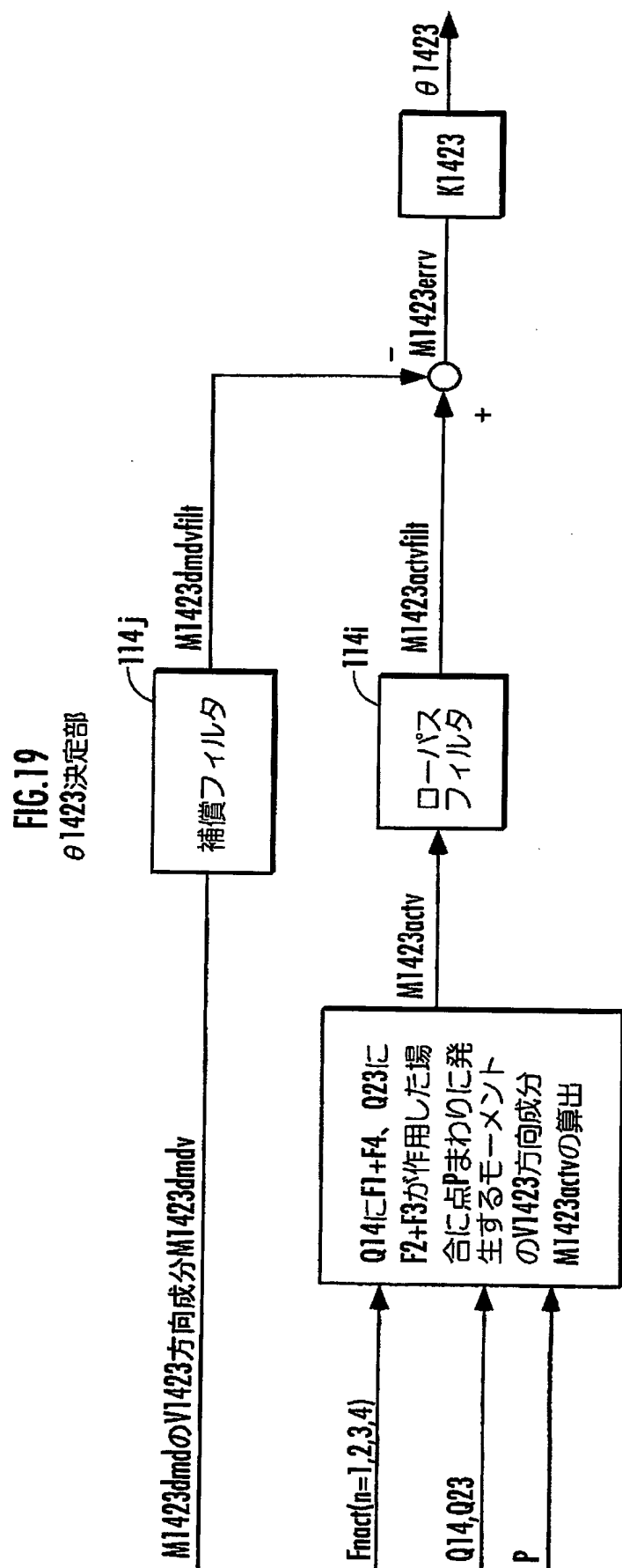
【図18】

FIG.18

補償全床反力のモーメントの分配器

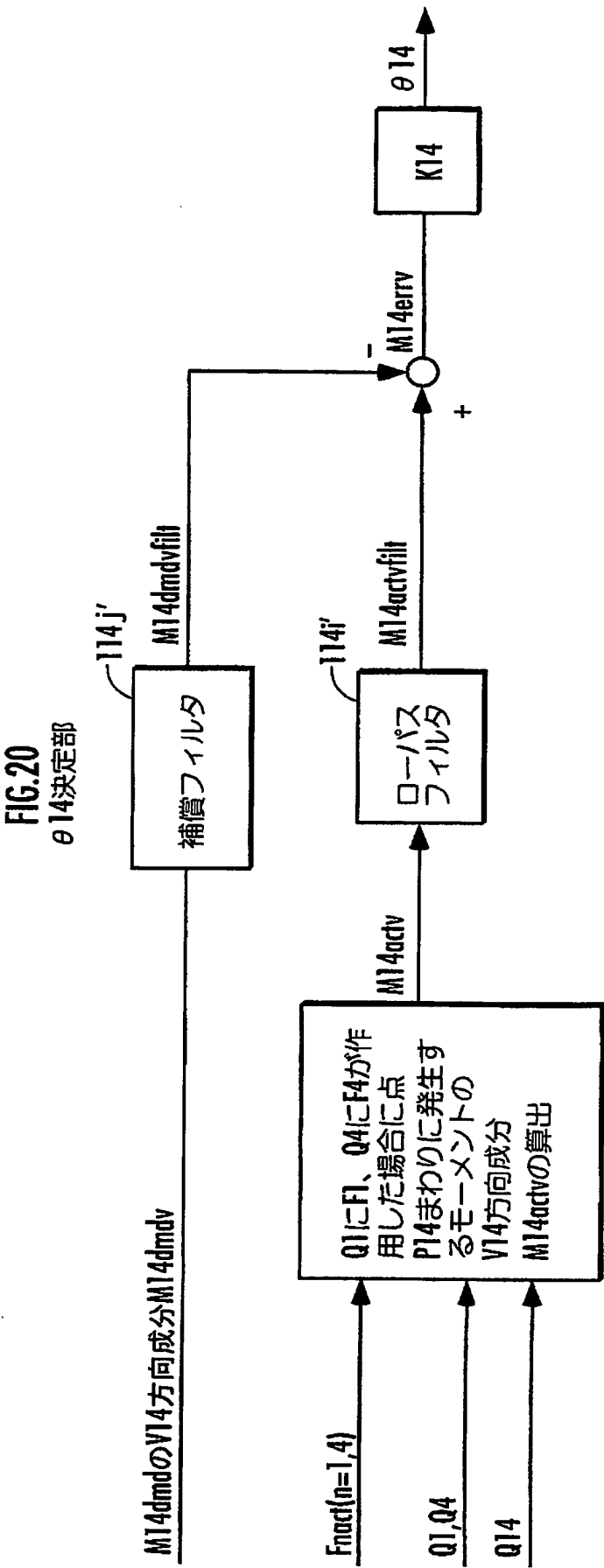


【図 19】



ただし、V1423は、線分Q14Q23と直交する水平単位ベクトル

【図 20】



ただし、V14は、線分Q1Q4と直交する水平単位ベクトル
Z方向成分に關しても同様の処理を行っても良い。V14方向の代わりにZ方向を用いる。

【図 21】

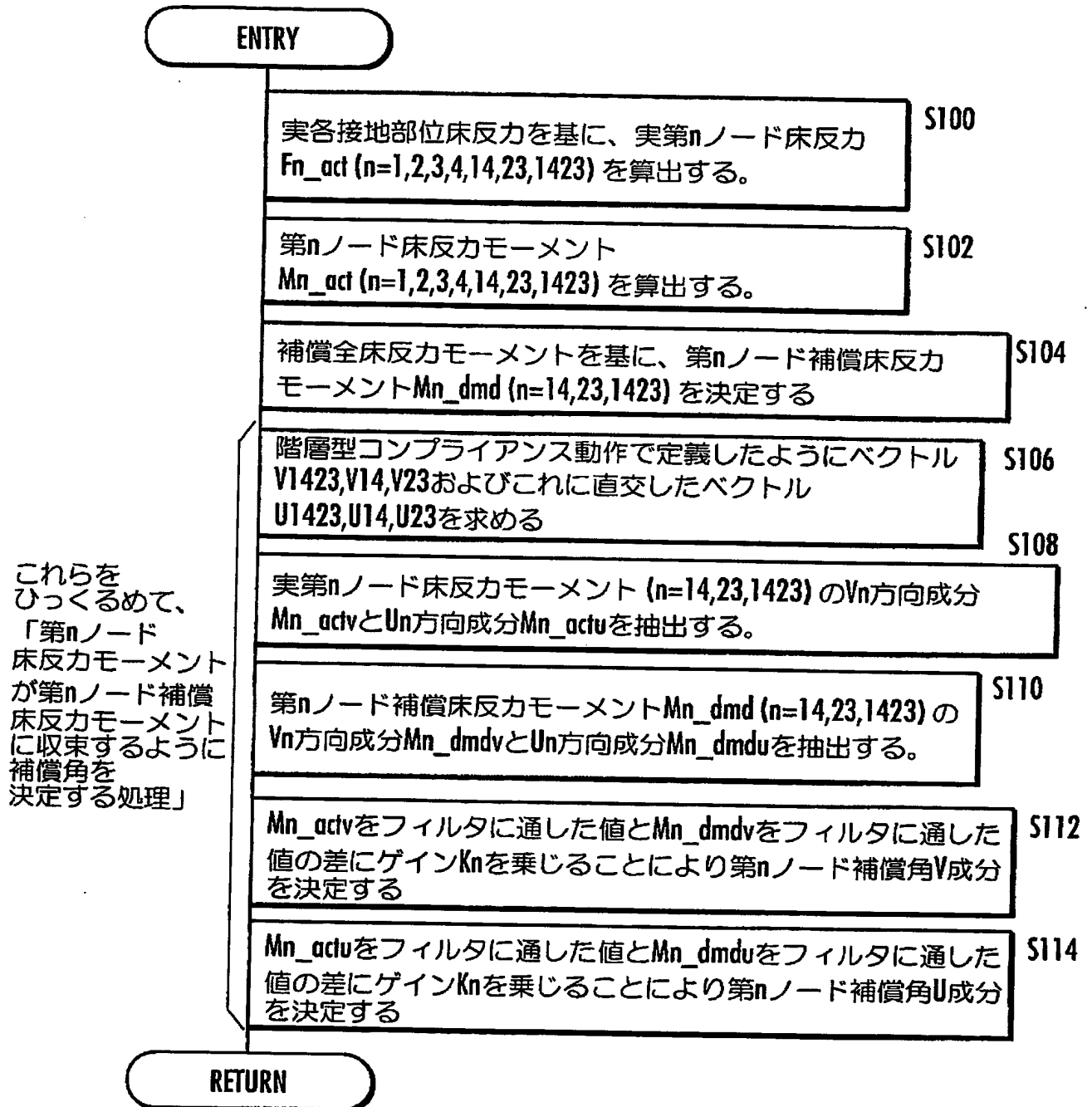
FIG.21
機構変形補償量算出



【図 22】

FIG.22

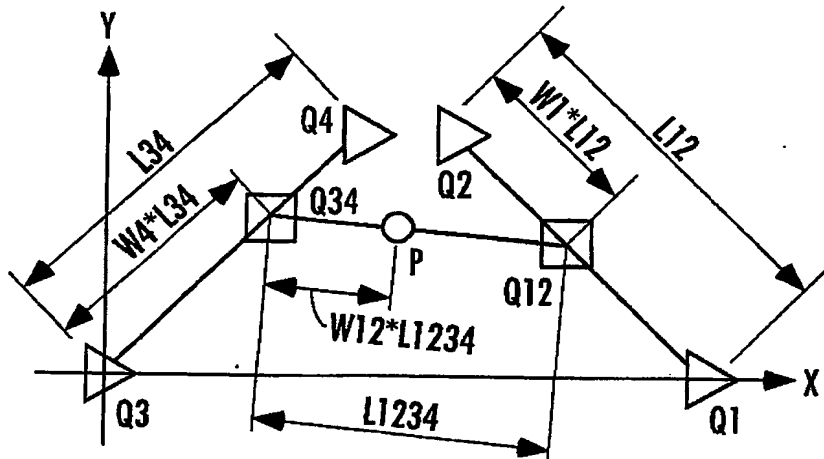
各補償角決定サブルーチン（一般形）



【図 23】

FIG.23

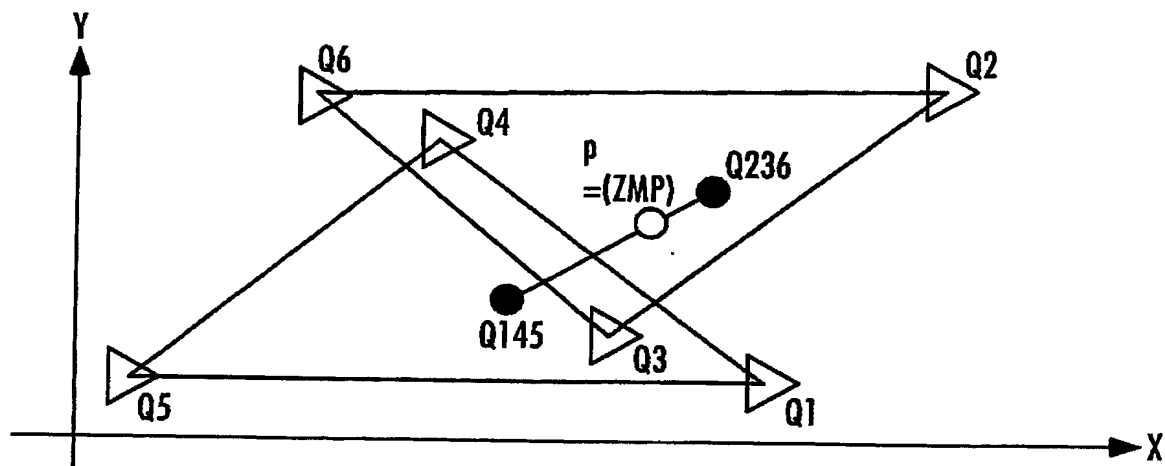
4脚ロボットの階層構造バリエーションの図



【図 24】

FIG.24

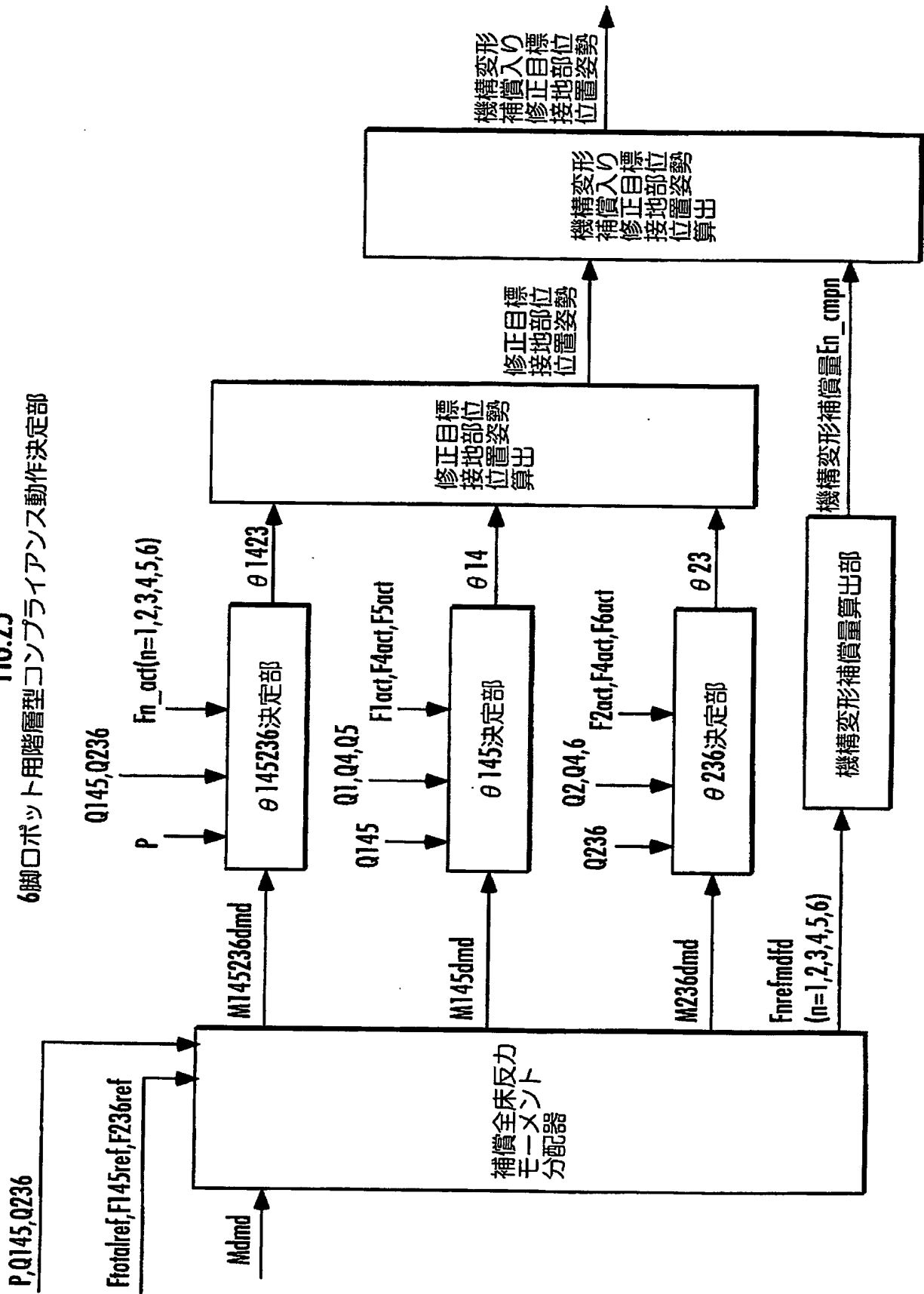
6脚ロボットの基本階層構造の図



【図 25】

FIG.25

6脚ロボット用階層型コンプライアンス動作決定部



【図 26】

FIG.26

6脚ロボットの補償全床反力モーメント分配の図

$$Mdmd = M145236dmd + M145dmd + M236dmd$$

$$M145236dmd = (Pmdfd - P) * Ftotalref$$

$$M145dmd = (Q145mdfd - Q145) * F145ref$$

$$M236dmd = (Q236mdfd - Q236) * F236ref$$

を満足するように $Pmdfd$ 、 $Q145mdfd$ 、 $Q236mdfd$ を決定する。

ただし、 $Pmdfd$ は、 $Pmdfd$ 許容範囲内にあること。

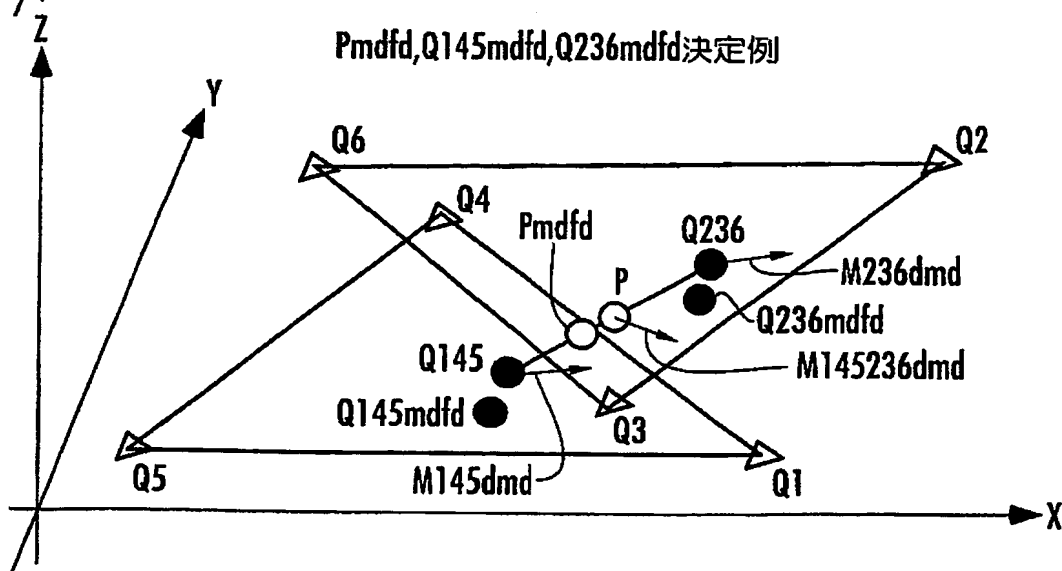
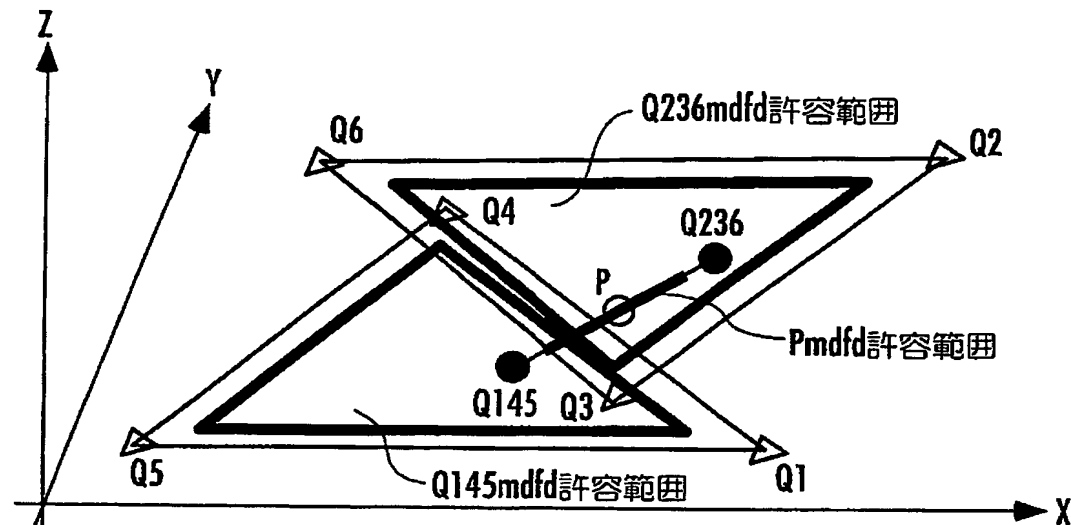
また、 $Q145mdfd$ は $Q145mdfd$ 許容範囲内にあること。

また、 $Q236mdfd$ は $Q236mdfd$ 許容範囲内にあること。

なお、 $Pmdfd$ 許容範囲は線分 $Q145Q236$ 内の部分的な線分である。

$Q145mdfd$ 許容範囲内は、三角形 $Q1Q4Q5$ 内の部分領域である。

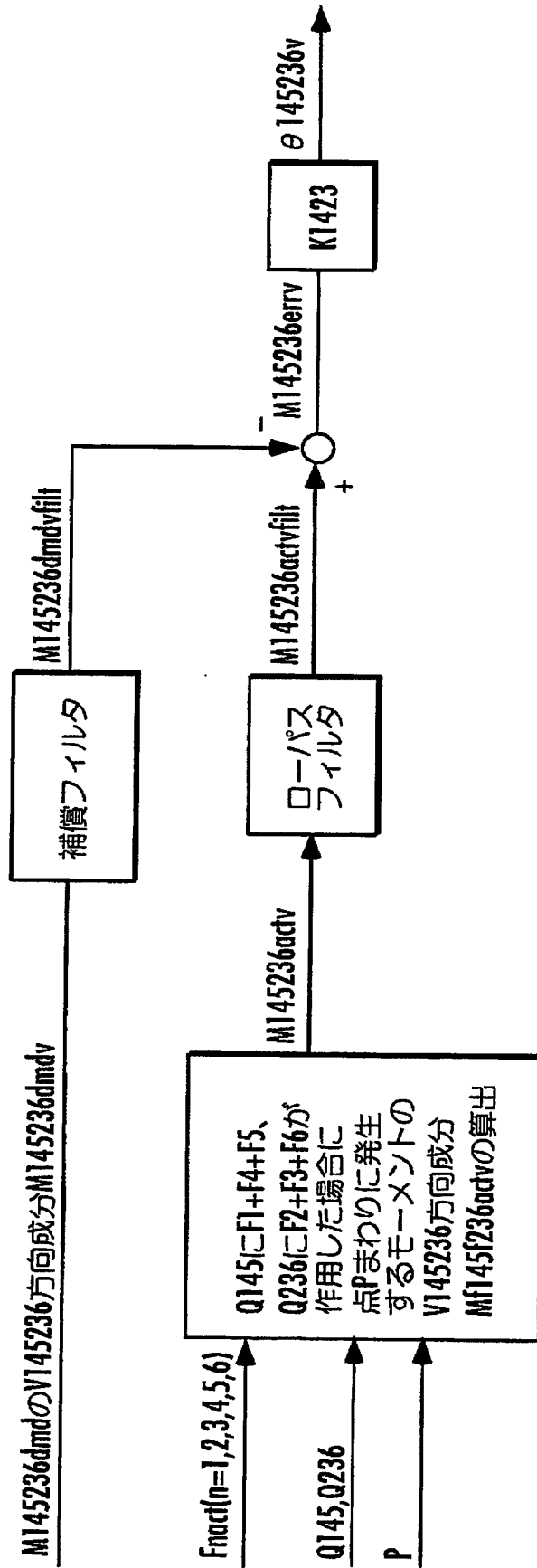
$Q236mdfd$ 許容範囲内は、三角形 $Q2Q3Q6$ 内の部分領域である。



【図 27】

FIG. 27

θ 145236決定部における θ 145236のV145236成分決定ブロック図

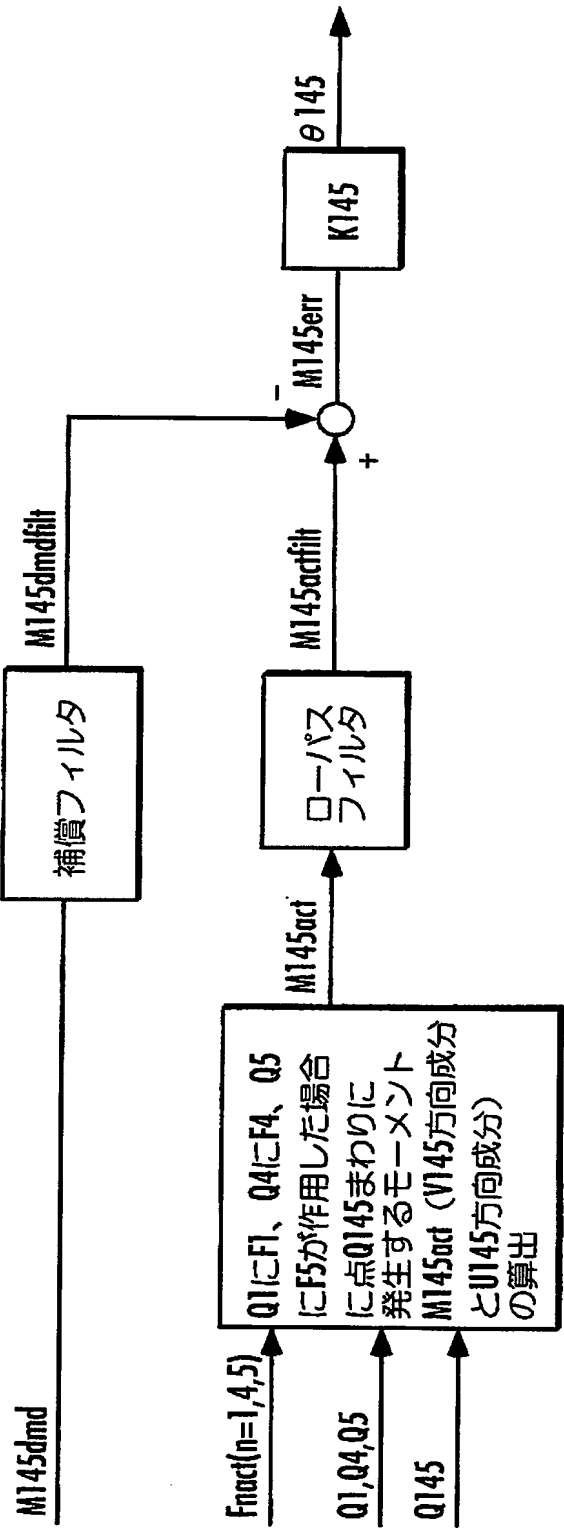


ただし、V145236は、線分Q145Q236と直交する水平単位ベクトル

【図 28】

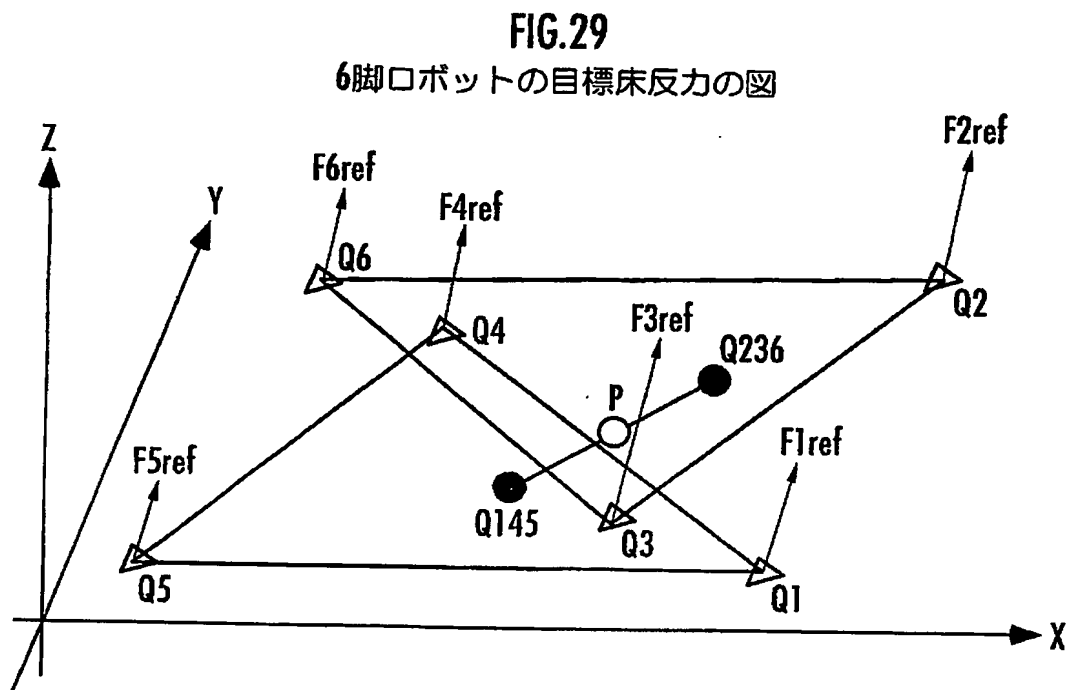
FIG.28

$\theta 145$ 決定部における $\theta 145$ のV145成分決定ブロック図



ただし、 $M145act = (M145actv, M145actu, 0)$
また、 $K145 = diag(K145x, K145y, K145z)$

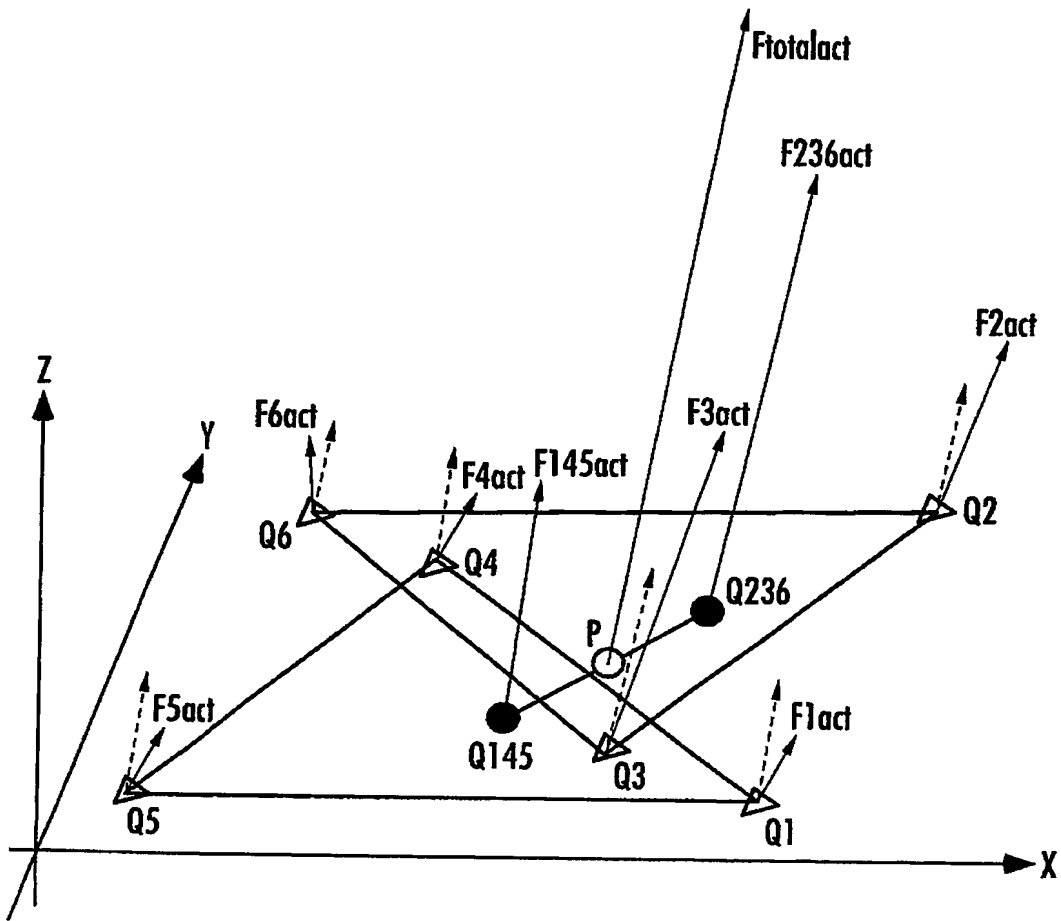
【図 29】



【図 30】

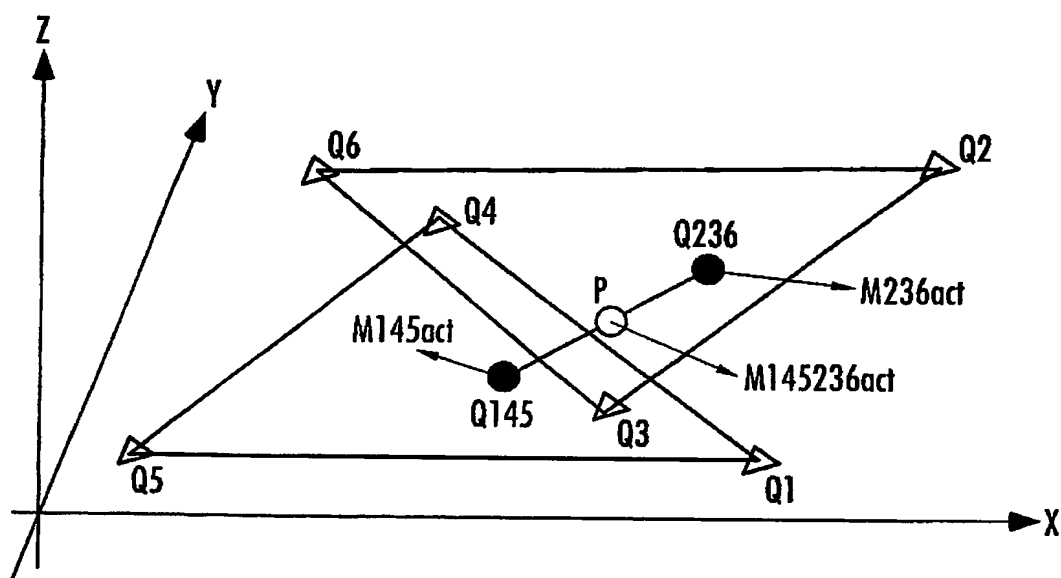
FIG.30

6脚ロボットの実床反力の図



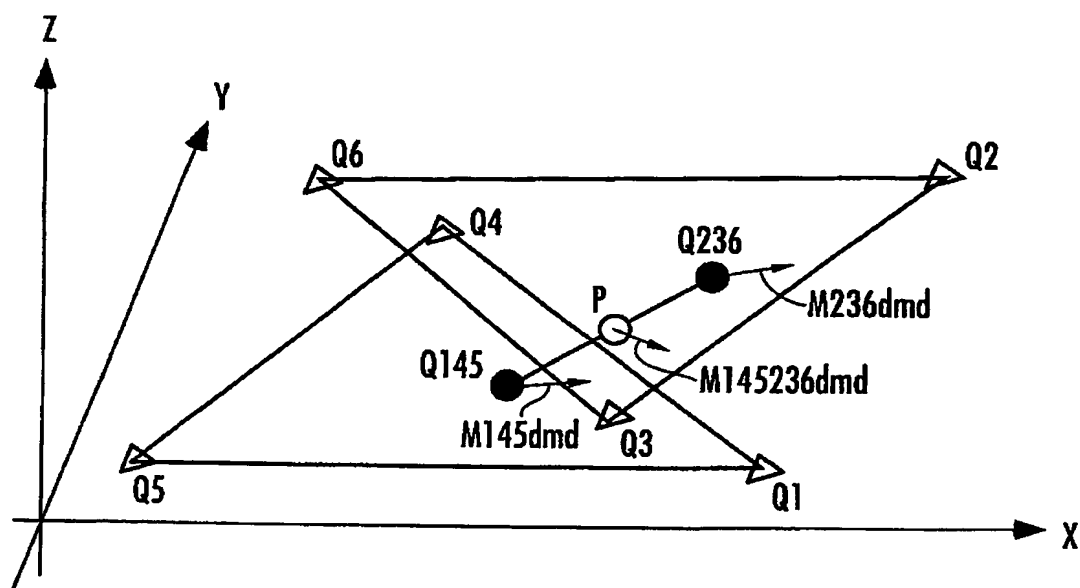
【図 31】

FIG.31
6脚ロボットの実床反力モーメントの図



【図 32】

FIG.32
6脚ロボットの補償床反力モーメントの図

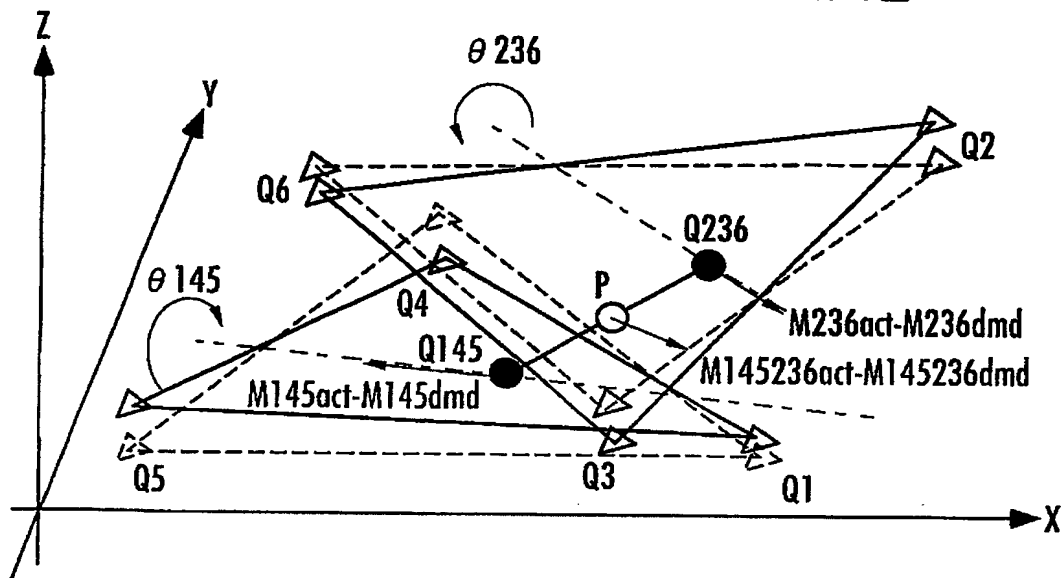


$M_{dmd} = M_{145236dmd} + M_{145dmd} + M_{236dmd}$ をほぼ満足するように

【図 33】

FIG.33

6脚ロボットの下層コンプライアンス動作の図

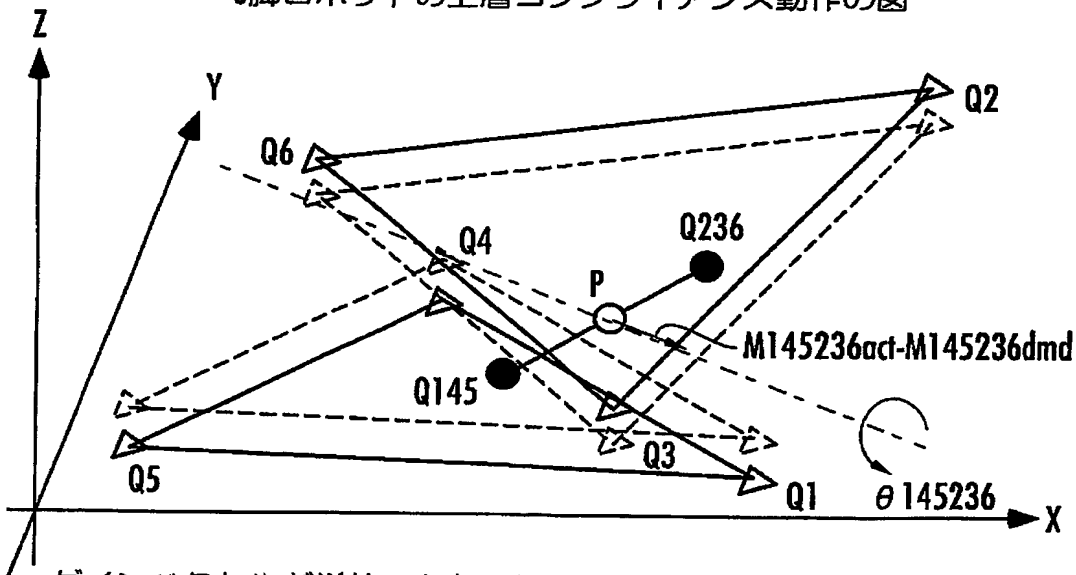


ゲインベクトルが単位ベクトルにスカラーのゲインを掛けたものならば、 $\theta 236$ 、 $\theta 145$ の回転軸向きは、モーメント差ベクトル($M236act-M236dmd$)および($M145act-M145dmd$)と同じ向きになる。

【図 34】

FIG.34

6脚ロボットの上層コンプライアンス動作の図

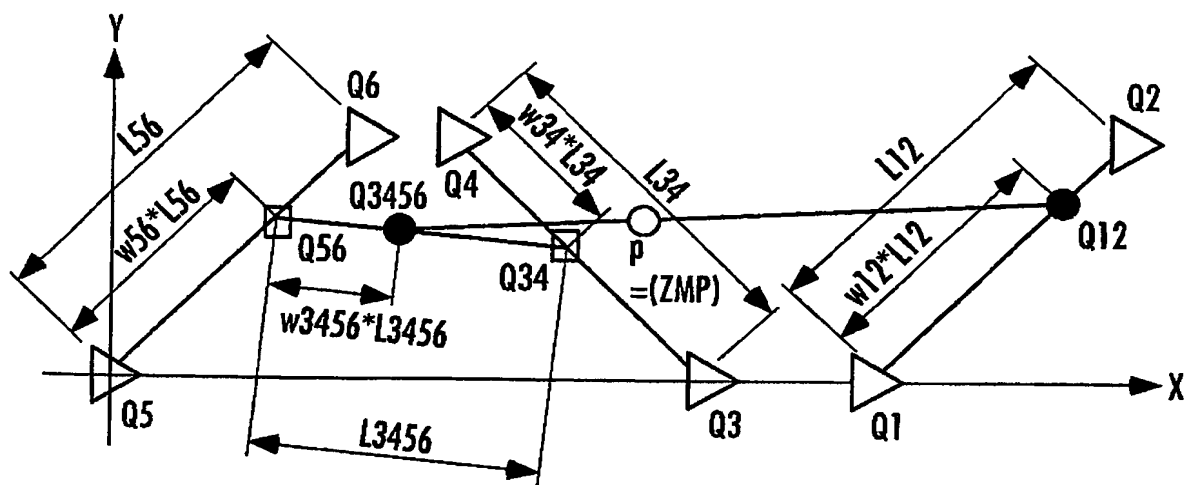


ゲインベクトルが単位ベクトルにスカラーのゲインを掛けたものならば、 $\theta 236$ 、 $\theta 145$ の回転軸向きは、モーメント差ベクトル($M145236act-M145236dmd$)と同じ向きになる。

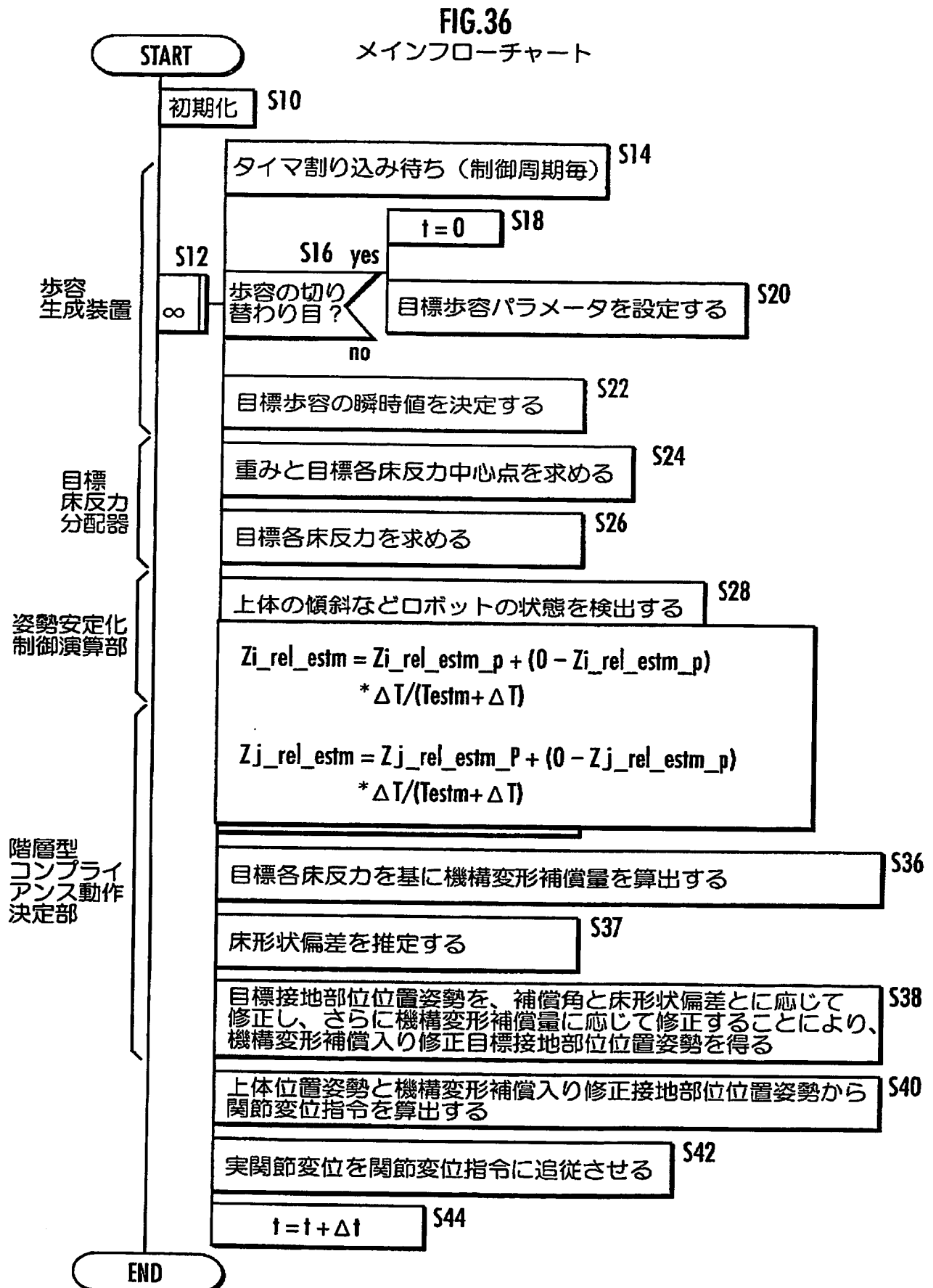
【図 35】

FIG.35

6脚ロボットの階層構造バリエーションの図



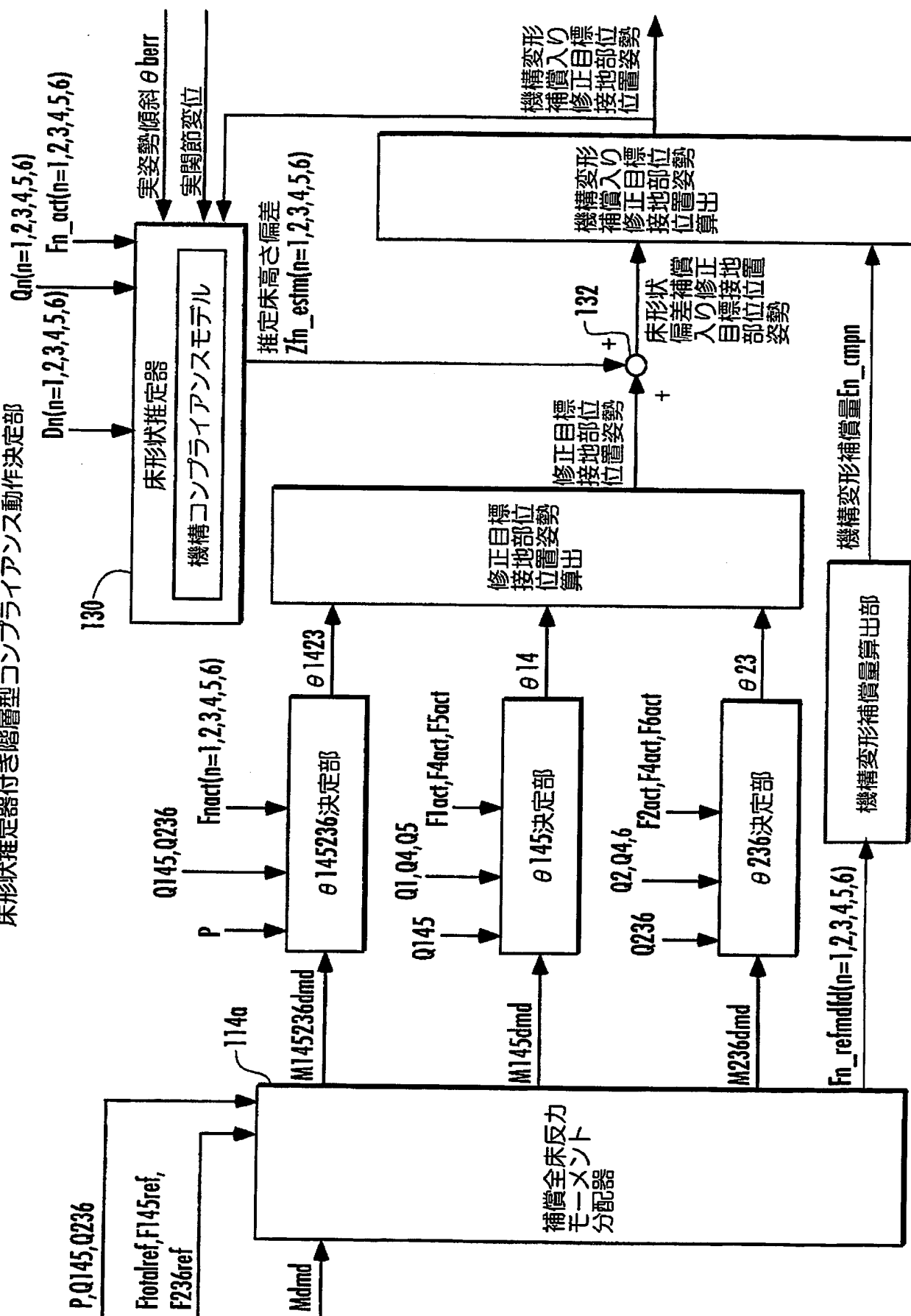
【図 36】



【図 37】

FIG.37

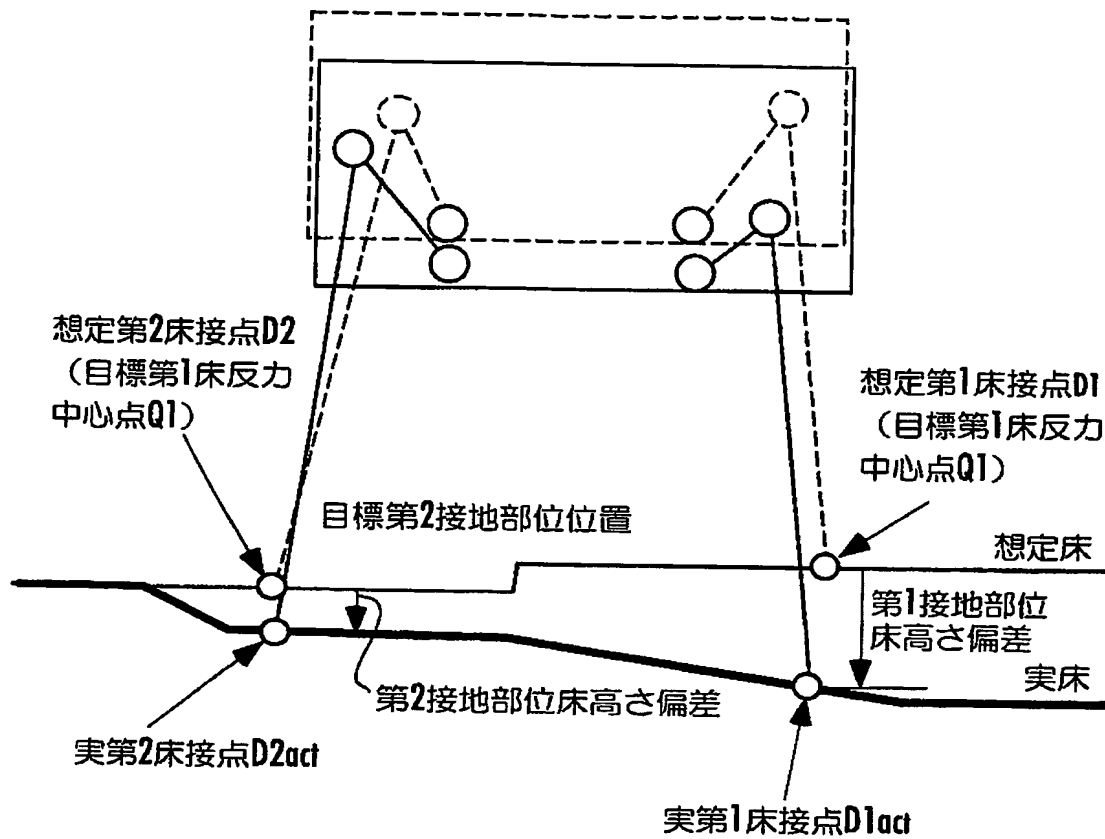
床形状推定器付き階層型コンプライアンス動作決定部



【図 38】

FIG.38

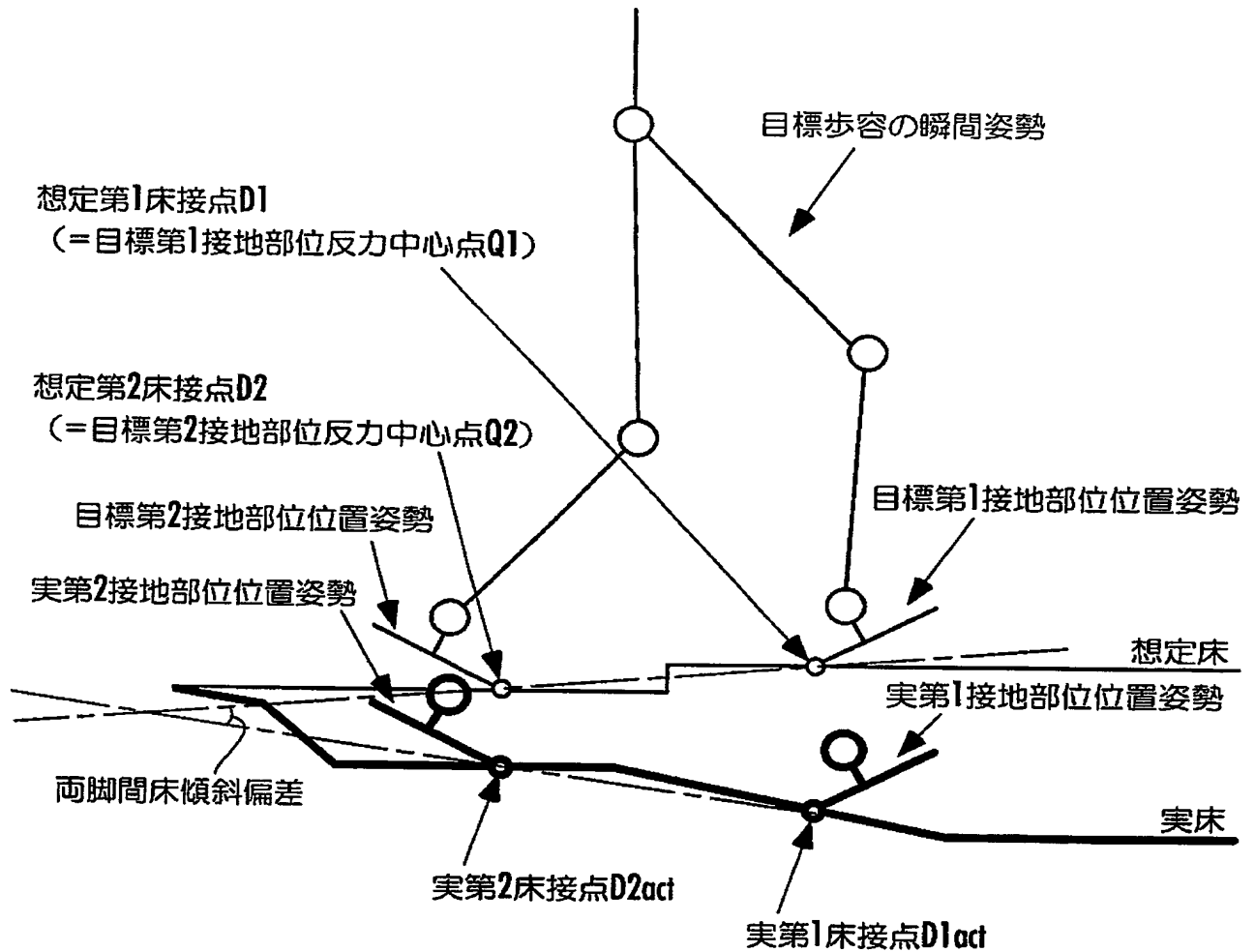
床形状偏差の定義図（多脚ロボットの場合）



【図 39】

FIG.39

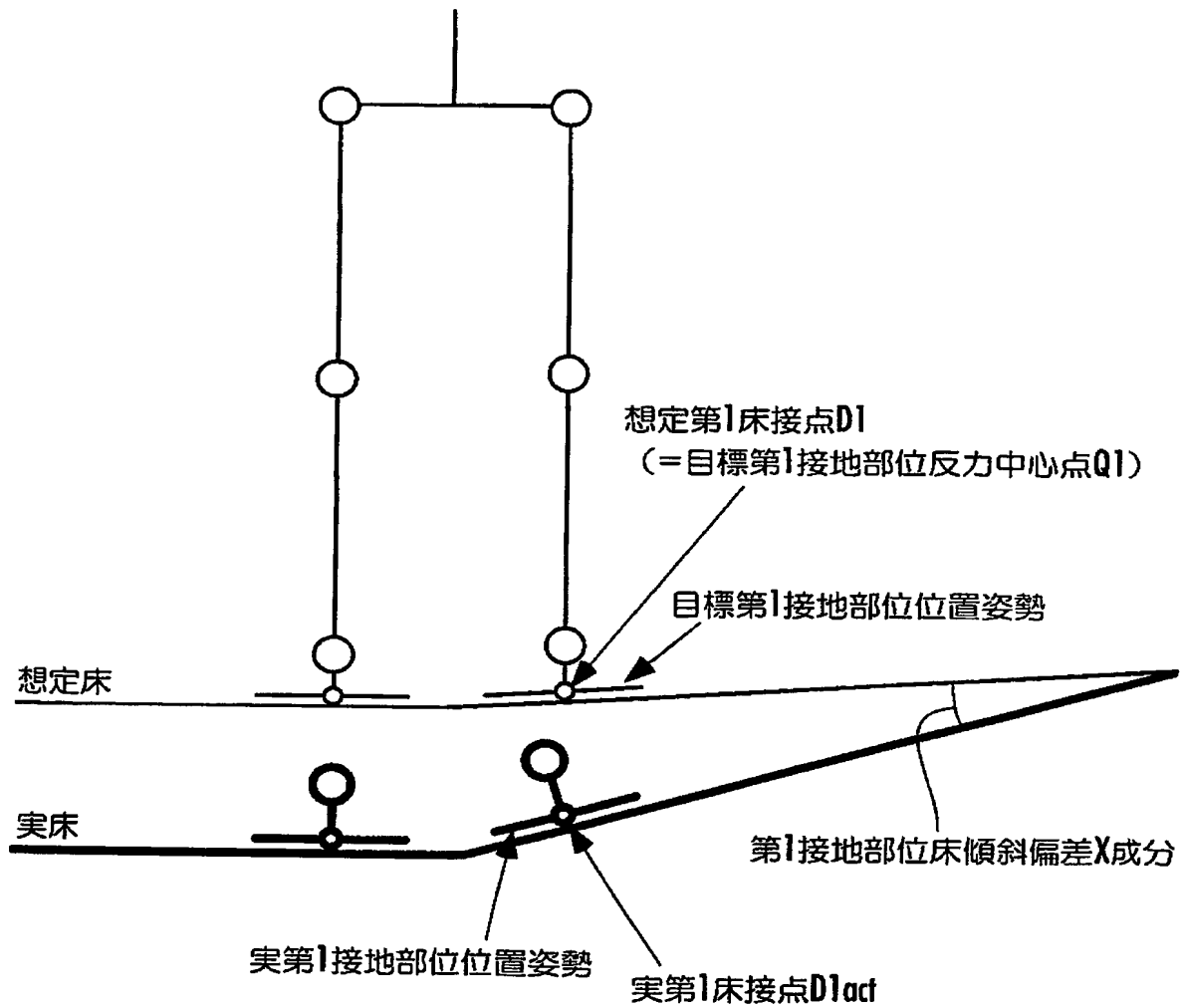
床形状偏差の定義図（足平付き2脚ロボットの場合）



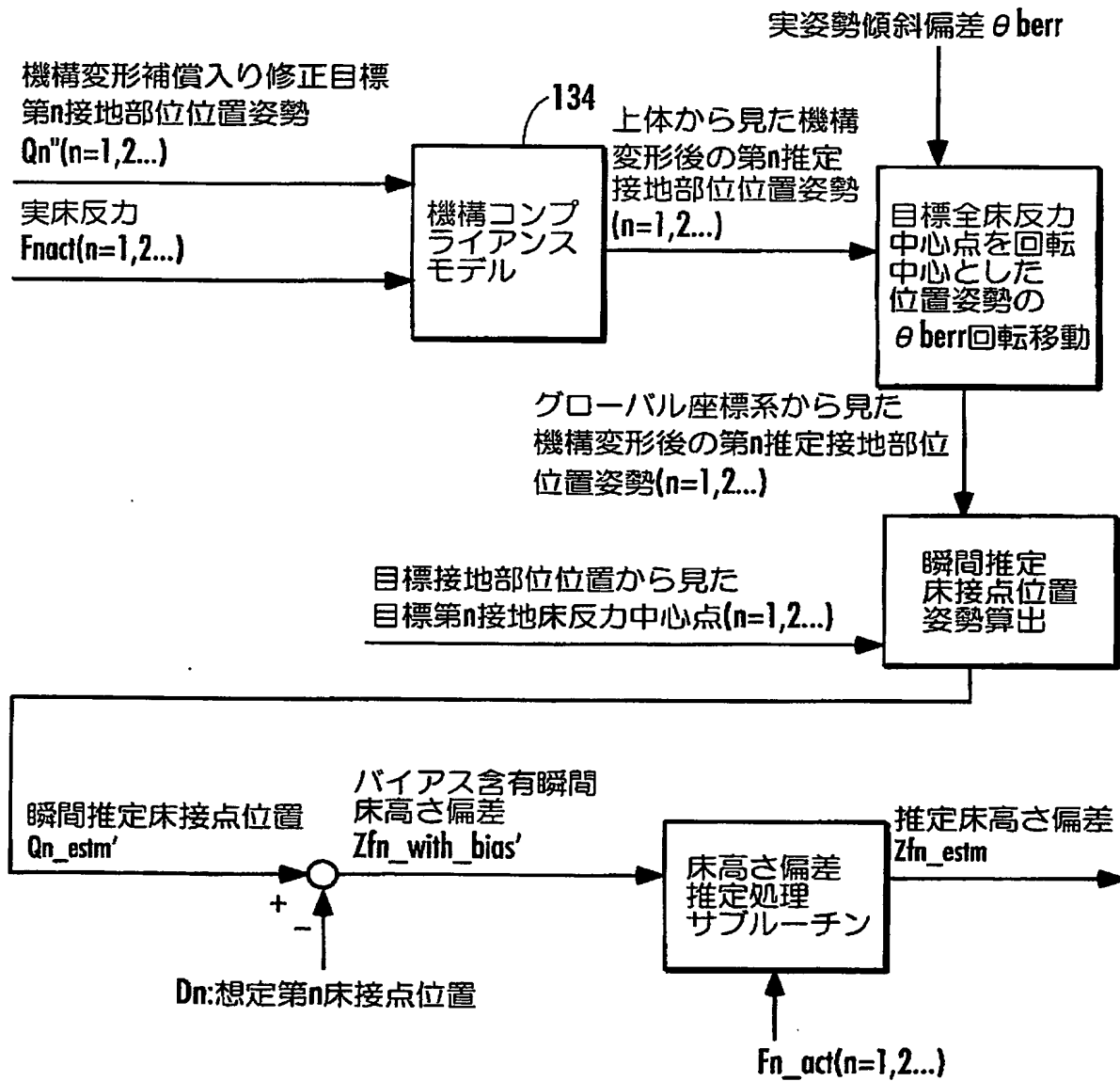
【図 40】

FIG.40

床形状偏差の定義図（足平付き2脚ロボットの場合）

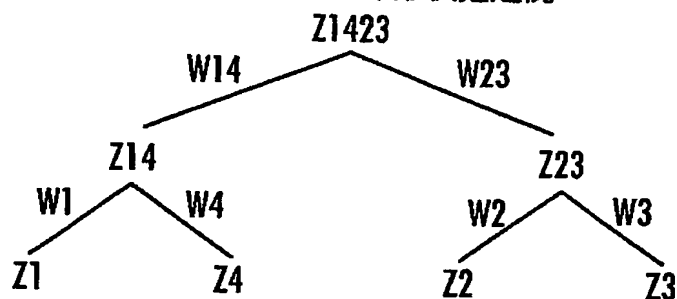


【図 4 1】

FIG.41
床形状推定メイン処理ブロック図

【図 4 2】

FIG.42
4脚ロボットの床形状推定例

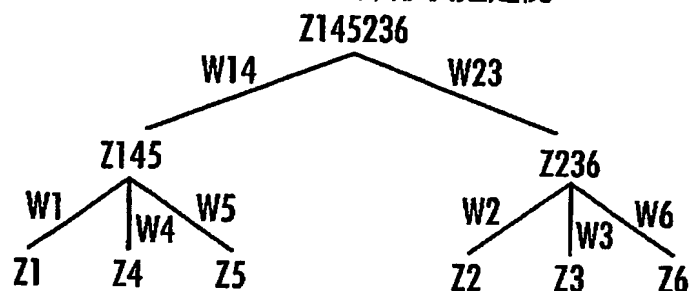


$$\begin{aligned}
 Z14_with_bias &= W1 \cdot Z1_with_bias + W4 \cdot Z4_with_bias \\
 Z23_with_bias &= W2 \cdot Z2_with_bias + W3 \cdot Z3_with_bias \\
 Z1423_with_bias &= W14 \cdot Z14_with_bias + W23 \cdot Z23_with_bias
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z1_rel &= Z1_with_bias - Z14_with_bias \\
 Z4_rel &= Z4_with_bias - Z14_with_bias \\
 Z2_rel &= Z2_with_bias - Z23_with_bias \\
 Z3_rel &= Z3_with_bias - Z23_with_bias \\
 Z14_rel &= Z14_with_bias - Z1423_with_bias \\
 Z23_rel &= Z23_with_bias - Z1423_with_bias
 \end{aligned}$$

【図 4 3】

FIG.43
6脚ロボットの床形状推定例



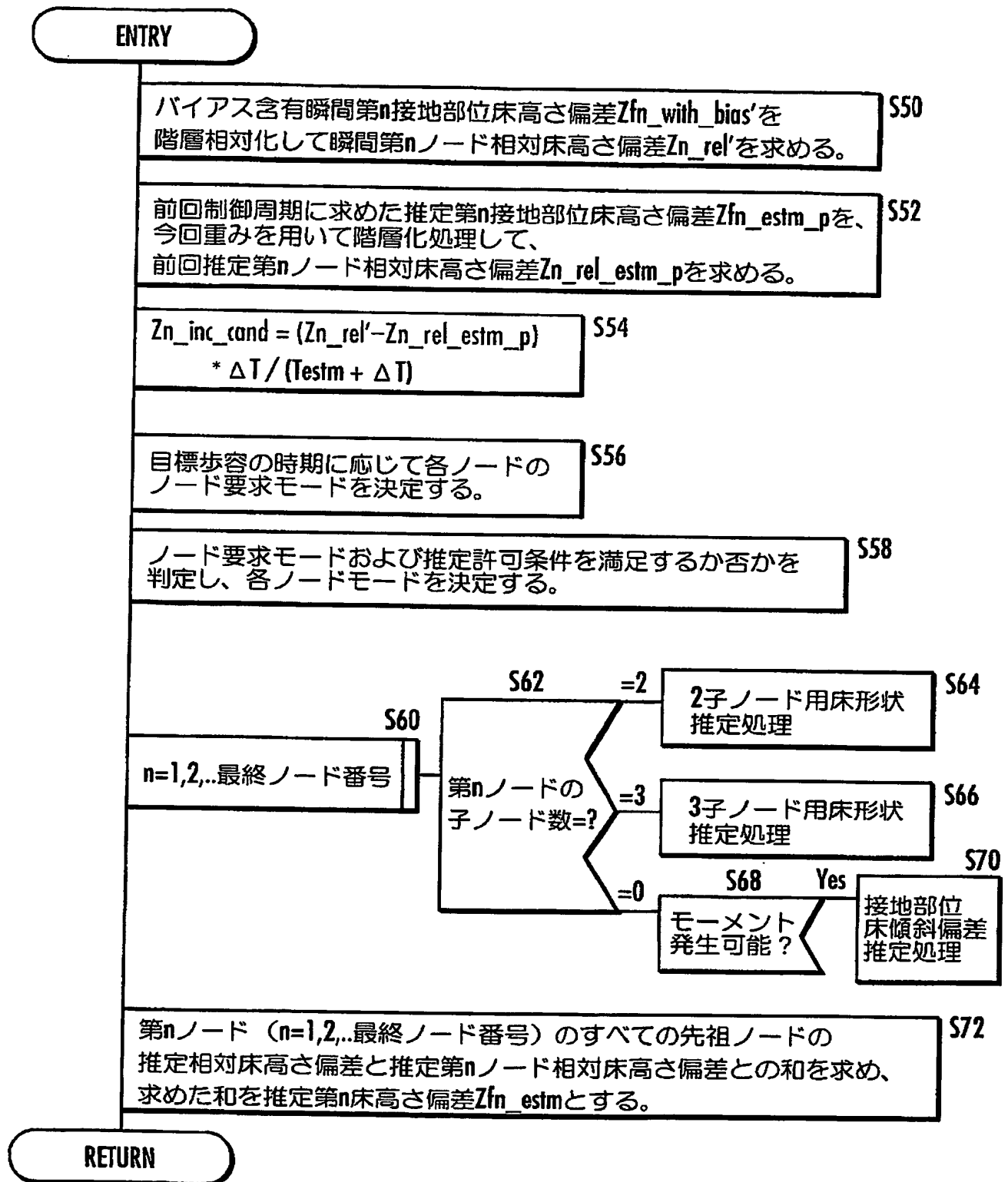
$$\begin{aligned}
 Z145_with_bias &= W1 \cdot Z1_with_bias + W4 \cdot Z4_with_bias + W5 \cdot Z5_with_bias \\
 Z236_with_bias &= W2 \cdot Z2_with_bias + W3 \cdot Z3_with_bias + W6 \cdot Z6_with_bias \\
 Z145236_with_bias &= W145 \cdot Z145_with_bias + W236 \cdot Z236_with_bias
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z1_rel &= Z1_with_bias - Z145_with_bias \\
 Z4_rel &= Z4_with_bias - Z145_with_bias \\
 Z5_rel &= Z5_with_bias - Z145_with_bias \\
 Z2_rel &= Z2_with_bias - Z236_with_bias \\
 Z3_rel &= Z3_with_bias - Z236_with_bias \\
 Z6_rel &= Z6_with_bias - Z236_with_bias \\
 Z145_rel &= Z145_with_bias - Z145236_with_bias \\
 Z236_rel &= Z236_with_bias - Z145236_with_bias
 \end{aligned}$$

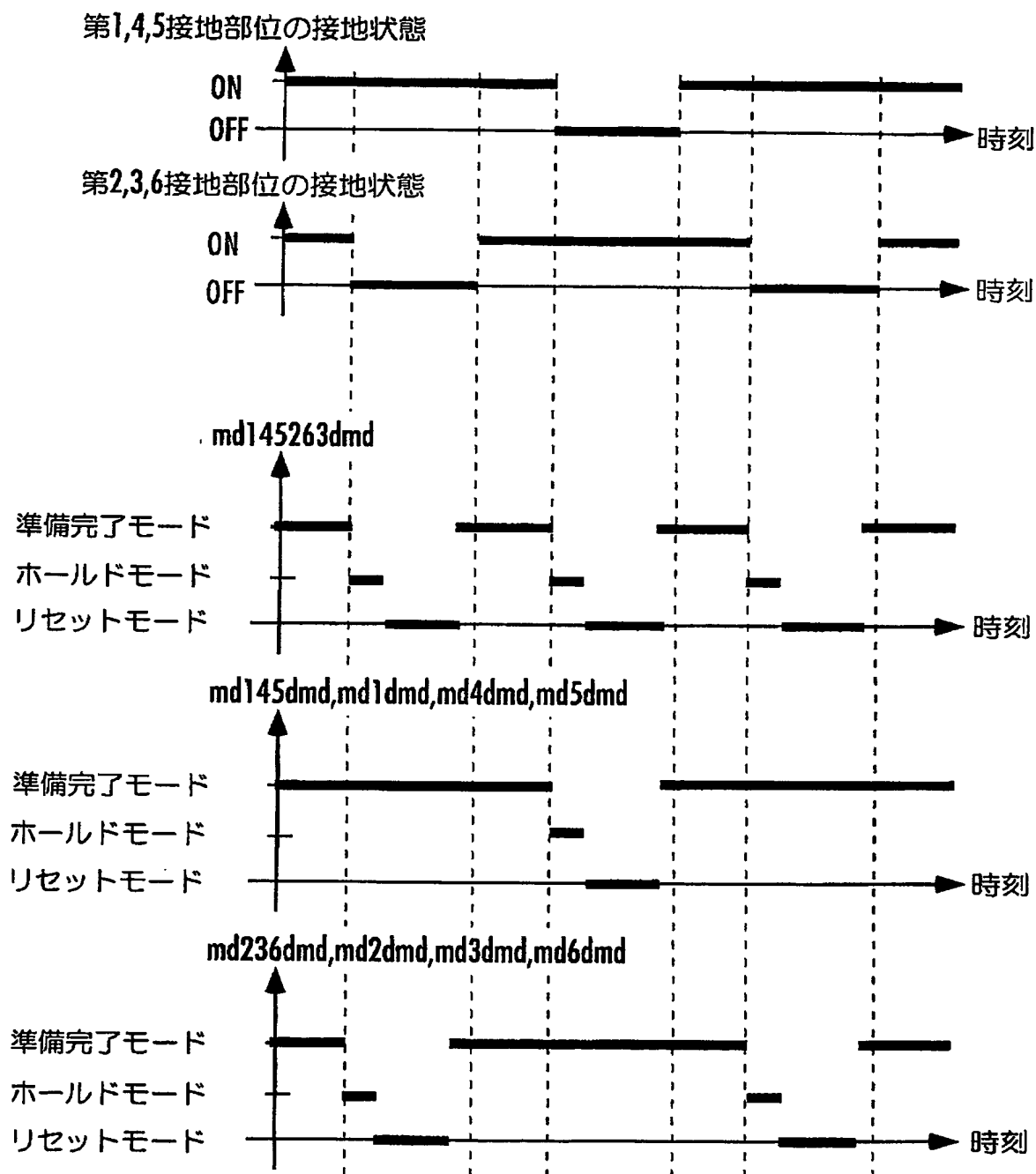
【図 4 4】

FIG.44

床高さ偏差推定処理サブルーチン



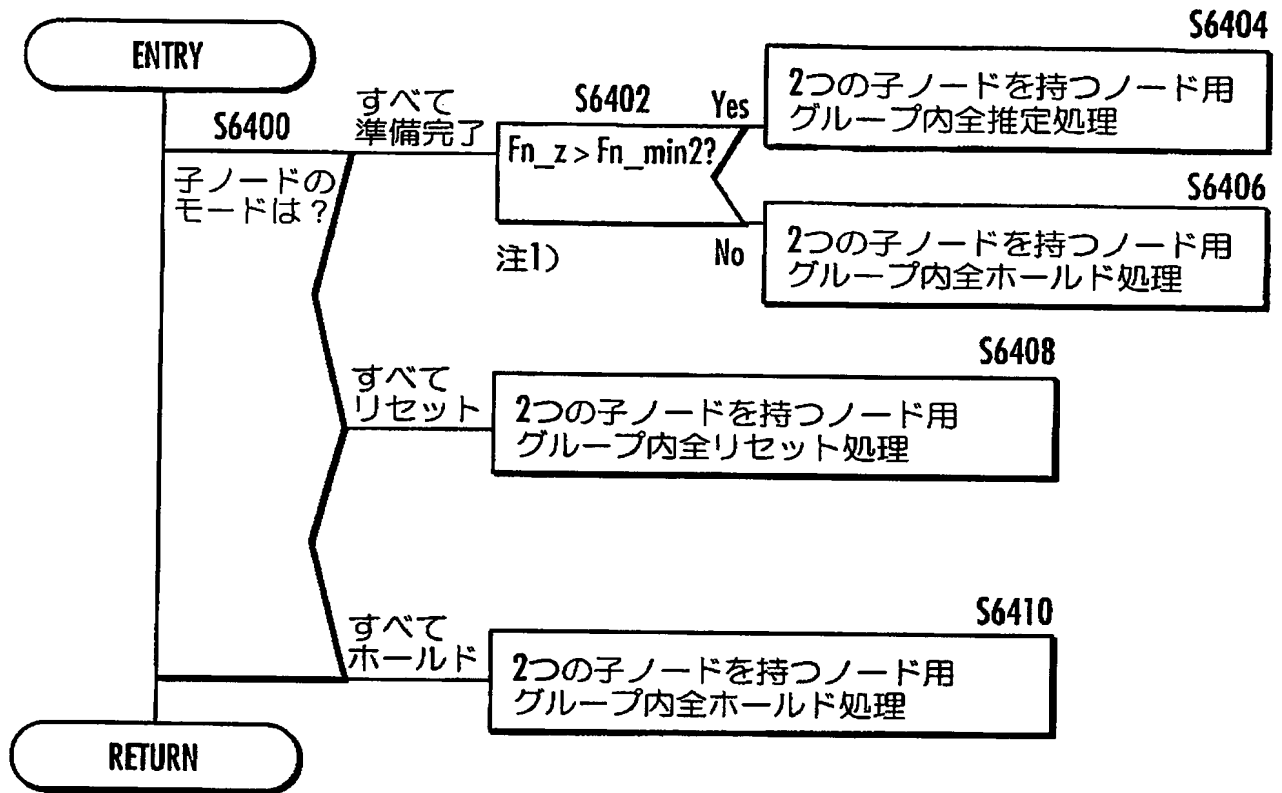
【図 45】

FIG.45
要求モード遷移図

【図 46】

FIG.46

2つの子ノードを持つノード用床形状推定処理



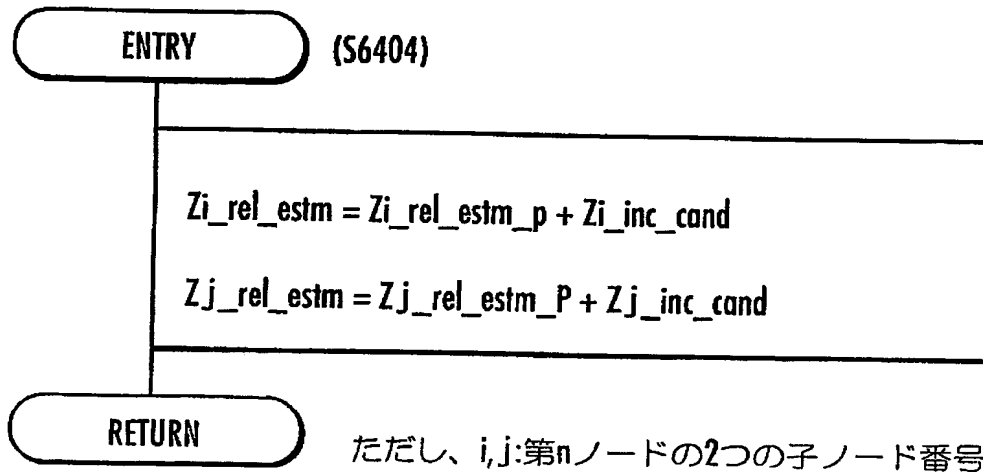
注1)

第 n ノードの子ノードの床反力の合力 F_n_z が所定の値 F_n_min2 より小さい場合には、床形状推定精度が下がり過ぎるので推定を行わず、ホールド処理にする。

【図 47】

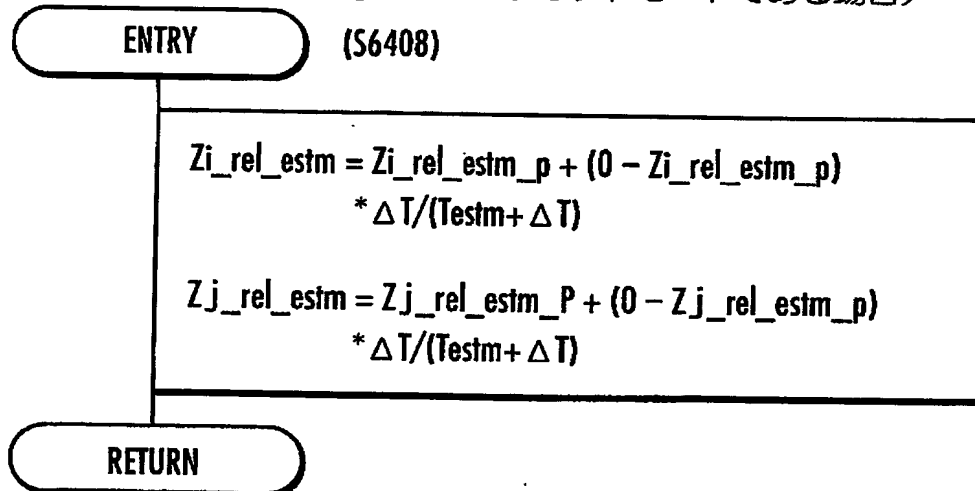
FIG.47

2つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理



【図 48】

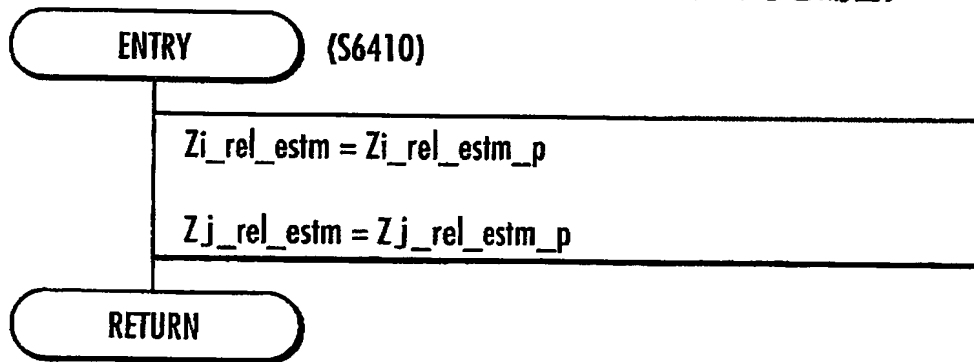
FIG.48

2つの子ノードを持つノード用リセット処理
(モードi、モードjがすべてリセットモードである場合)

【図 49】

FIG.49

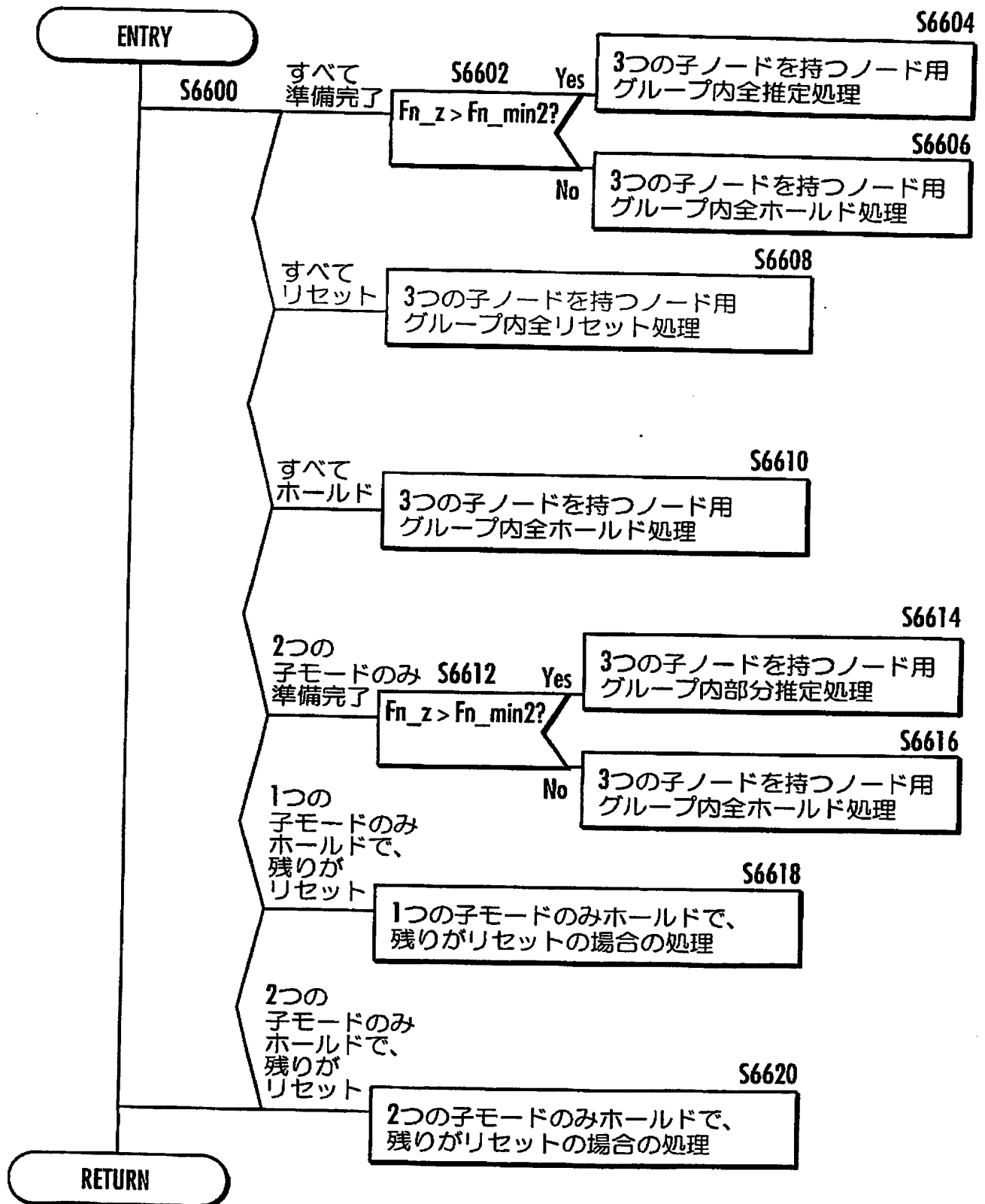
2つの子ノードを持つノード用ホールド処理
(モードi、モードjがすべてホールドモードである場合)



【図 50】

FIG.50

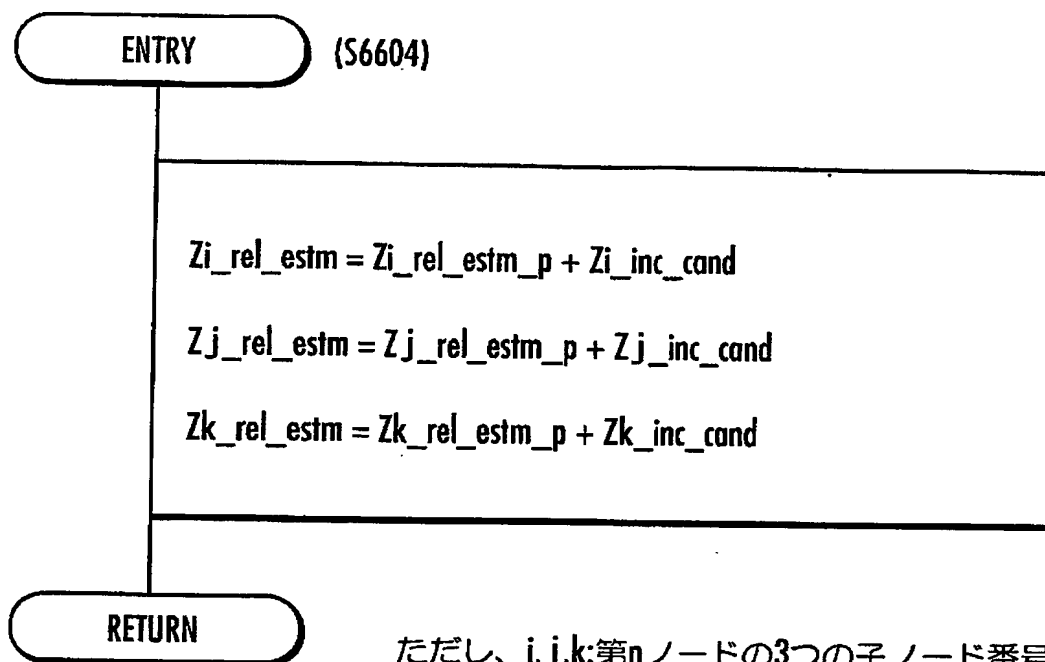
3つの子ノードを持つノード用床形状推定処理



【図 51】

FIG.51

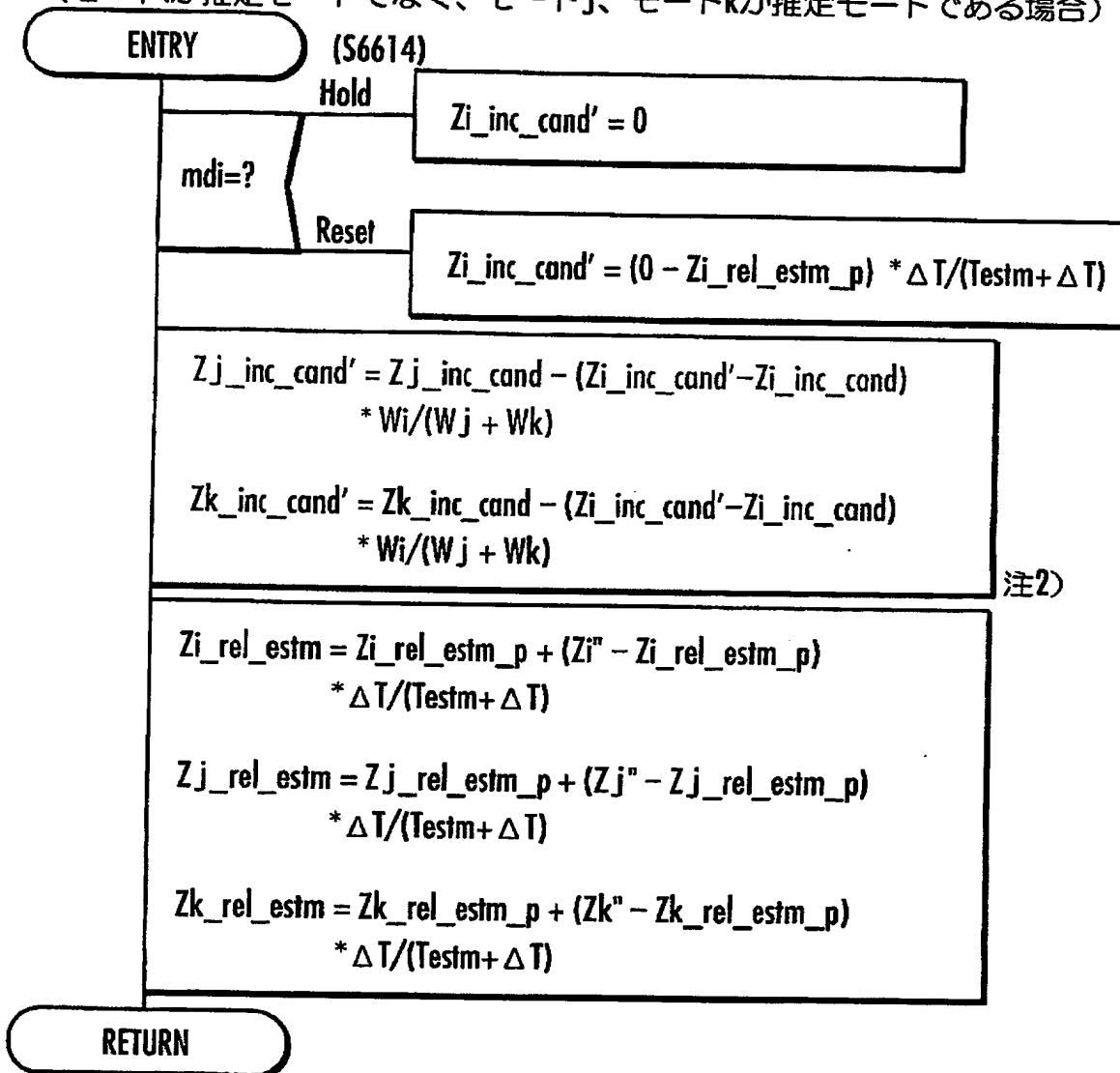
3つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理



【図 5 2】

FIG.52

3つの子ノードを持つノード用グループ内部分推定処理
(モードiが推定モードでなく、モードj、モードkが推定モードである場合)



注2)

注2)

すなわち、

$$Wi \cdot Zi_inc_cand' + Wj \cdot Zj_inc_cand' + Wk \cdot Zk_inc_cand' = 0$$

$$Zj_inc_cand' - Zj_inc_cand = Zk_inc_cand' - Zk_inc_cand$$

を満足するように Zj_inc_cand' , Zk_inc_cand' を決定する。

言い換えると、

$$Wi \cdot Zi_rel_estm + Wj \cdot Zj_rel_estm + Wk \cdot Zk_rel_estm = 0$$

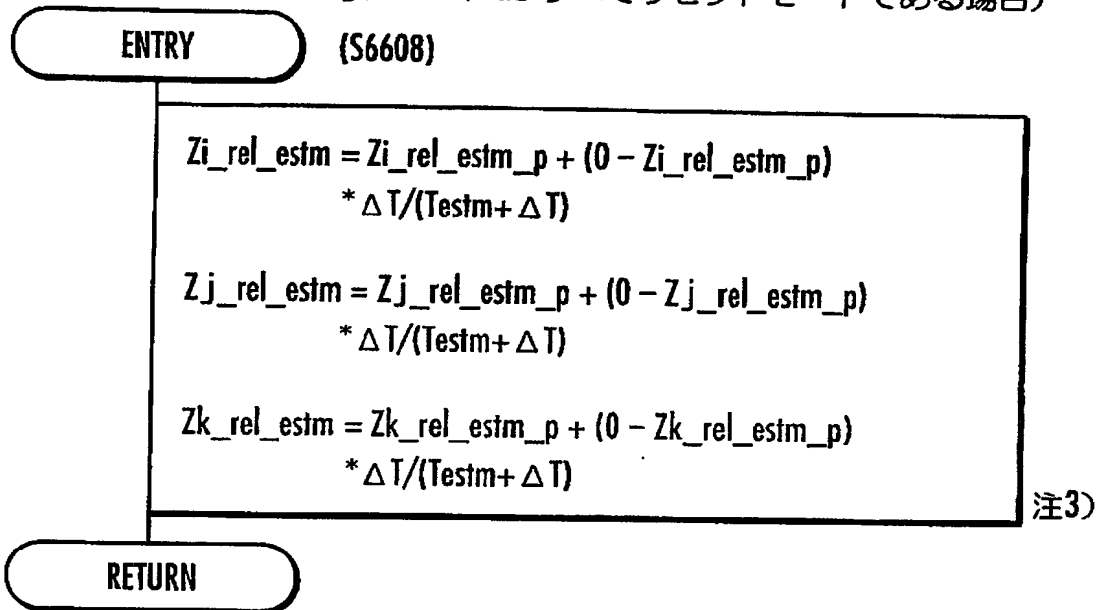
を満足しつつ、 $Zj_rel_estm - Zk_rel_estm$ が $Zj_inc_cand - Zk_inc_cand$ に近づくように Zi_rel_estm , Zj_rel_estm , Zk_rel_estm を決定する。

これらのように1次遅れ要素を用いると、リセットモードで完全に0に戻るためには無限時間を要するので、本出願人が先に提案した有限整定関数発生器を用いて、有限時間で0に戻るようにしても良い。

【図 5 3】

FIG.53

3つの子ノードを持つノード用リセット処理
(モードi、モードj、モードkがすべてリセットモードである場合)



注3)

より、一般的には、 $Zi_rel_estm, Zj_rel_estm, Zk_rel_estm$ を、

$$Wi * Zi_rel_estm + Wj * Zj_rel_estm + Wk * Zk_rel_estm = 0$$

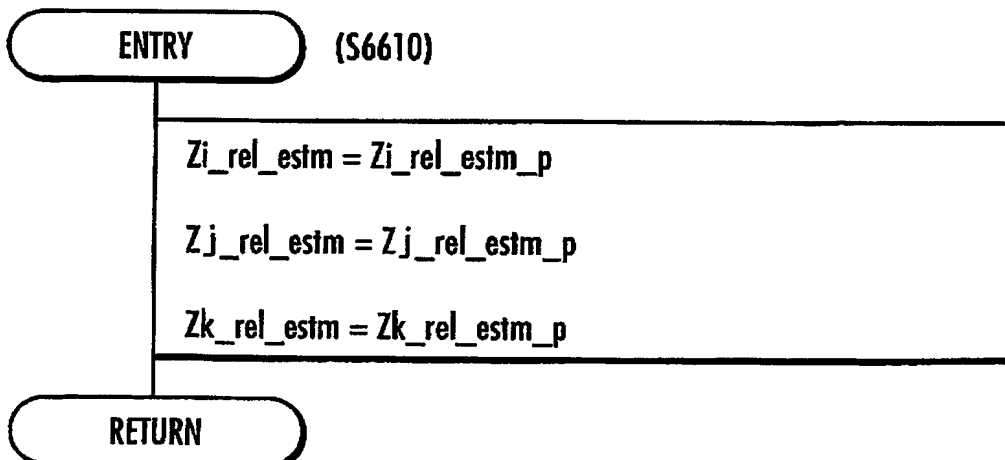
を満足しつつ、それぞれ $Zi_rel_estm_p, Zj_rel_estm_p, Zk_rel_estm_p$ よりも0に近い値に決定する。

本出願人が先に提案した有限整定関数発生器を用いても良い。

【図 5 4】

FIG.54

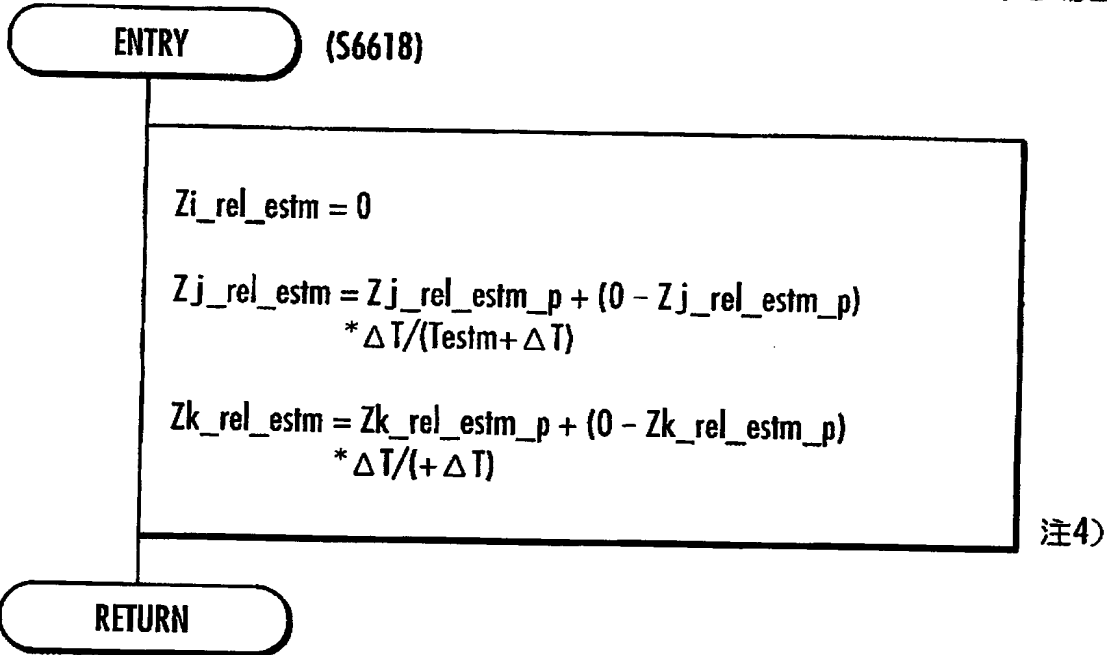
3つの子ノードを持つノード用全ホールド処理
(モードi、モードj、モードkがすべてホールドモードである場合)



【図 55】

FIG.55

3つの子ノードを持つノード用1つ子モードのみホールドで、
残りがリセットの場合の処理
(モードiがホールドモード、モードj、モードkがリセットモードである場合)



注4)

より、一般的には、
 Zi_rel_estm を0に決定し、

Zj_rel_estm, Zk_rel_estm を、

$$Wi * Zi_rel_estm + Wj * Zj_rel_estm + Wk * Zk_rel_estm = 0$$

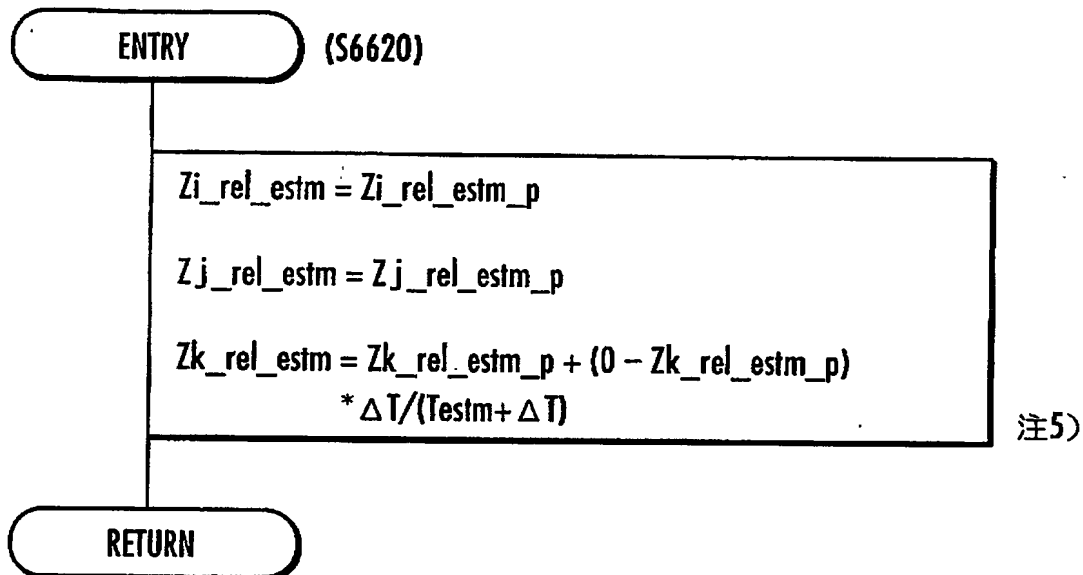
を満足しつつ、 $Zj_rel_estm_p, Zk_rel_estm_p$ よりも0に近い値に決定する。
本出願人が先に提案した有限整定関数発生器を用いても良い。

補足すると、 mdj, mdk が共にリセットモードになる時点までに、 Wj, Wk は0となっているはずだから、重みの和が1であるという条件から、この時点までに Wi が1となっており、また、 $Wi * Zi_rel_estm + Wj * Zj_rel_estm + Wk * Zk_rel_estm = 0$ であるから、この時点までに、 Zi_rel_estm は0となっている。

【図 56】

FIG.56

3つの子ノードを持つノード用2つ子モードのみホールドで、
残りがリセットの場合の処理
(モードi、モードjがホールドモード、モードkがリセットモードである場合)



注5)

より、一般的には、
 Zi_rel_estm を0に決定し、

Zj_rel_estm, Zk_rel_estm を、

$Zi_rel_estm + Zj_rel_estm + Zk_rel_estm = 0$

を満足しつつ、 $Zj_rel_estm_p, Zk_rel_estm_p$ よりも
0に近い値に決定する。

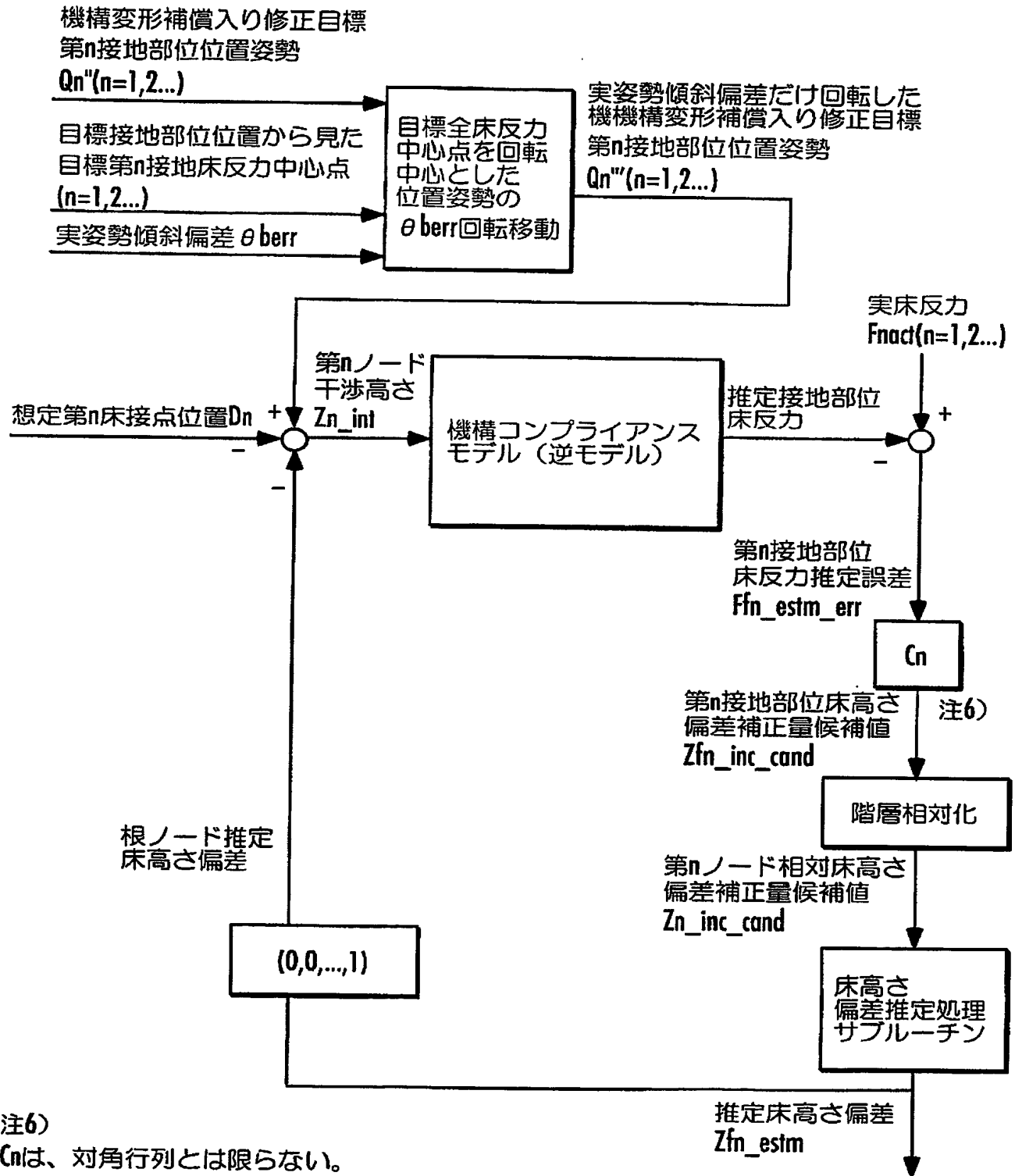
本出願人が先に提案した有限整定関数発生器を用いても良い。

補足すると、mdkが共にリセットモードになる時点までに、
 Wk は0となっている。

【図 57】

FIG.57

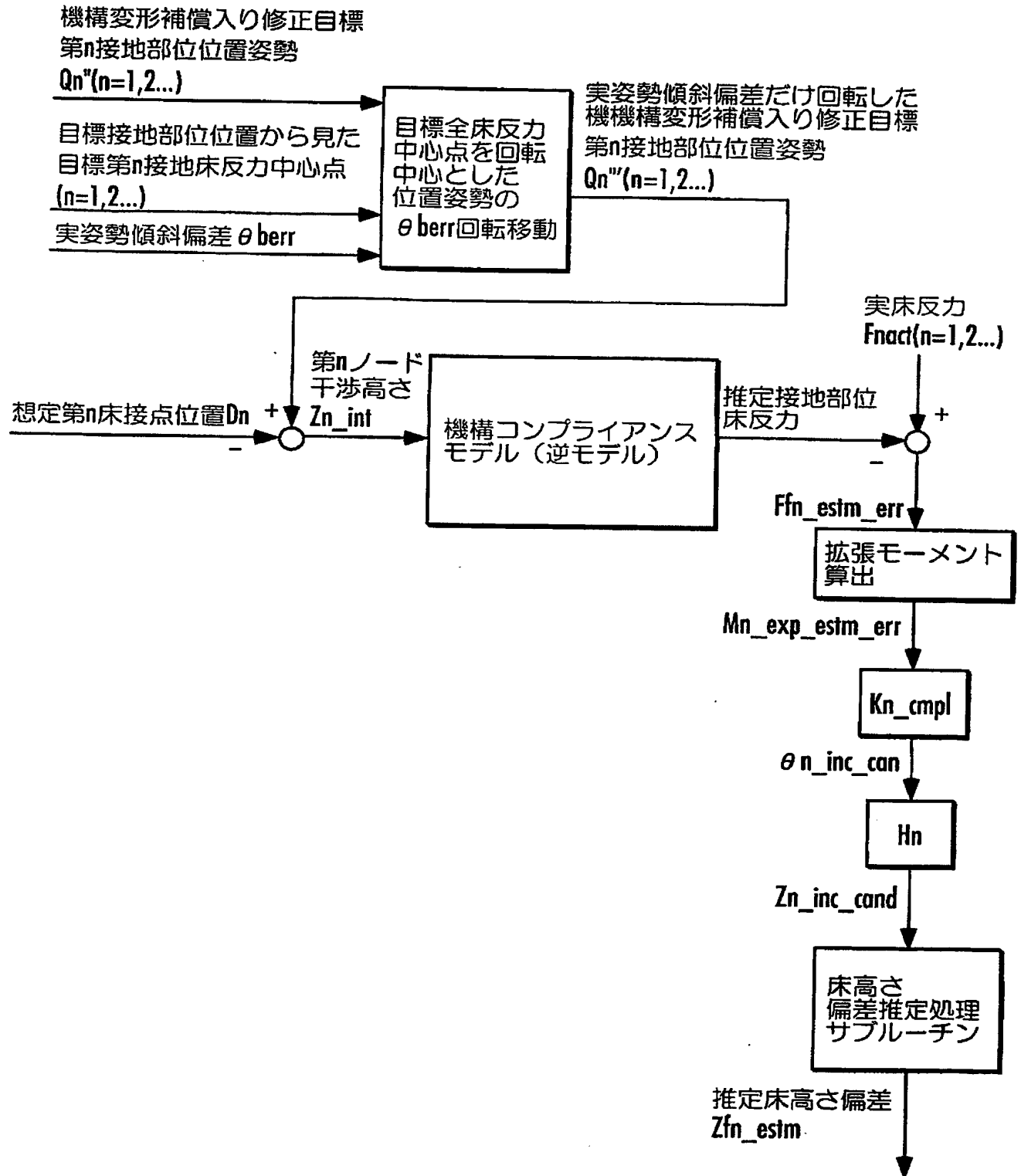
床形状推定メイン処理別手法ブロック図



【図 58】

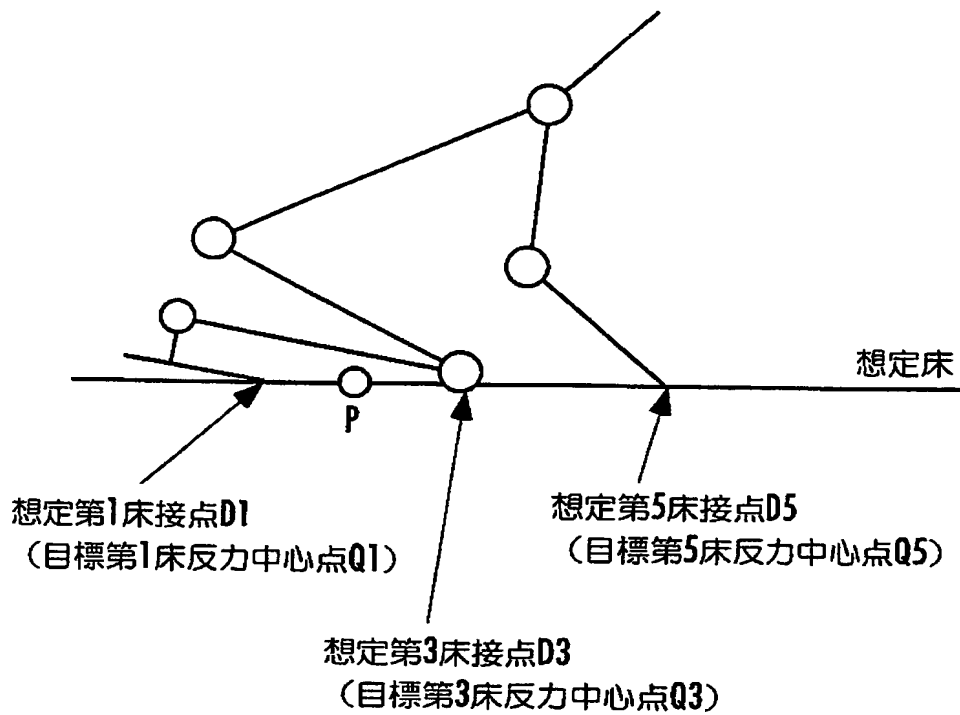
FIG.58

床形状推定メイン処理別手法（傾斜角推定）ブロック図



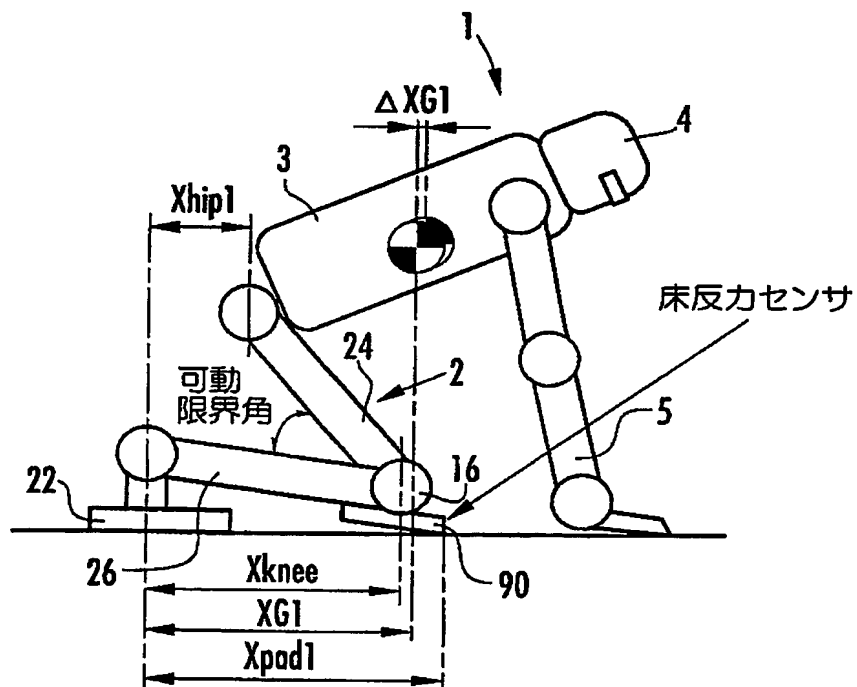
【図 59】

FIG.59
膝付き姿勢での床接点



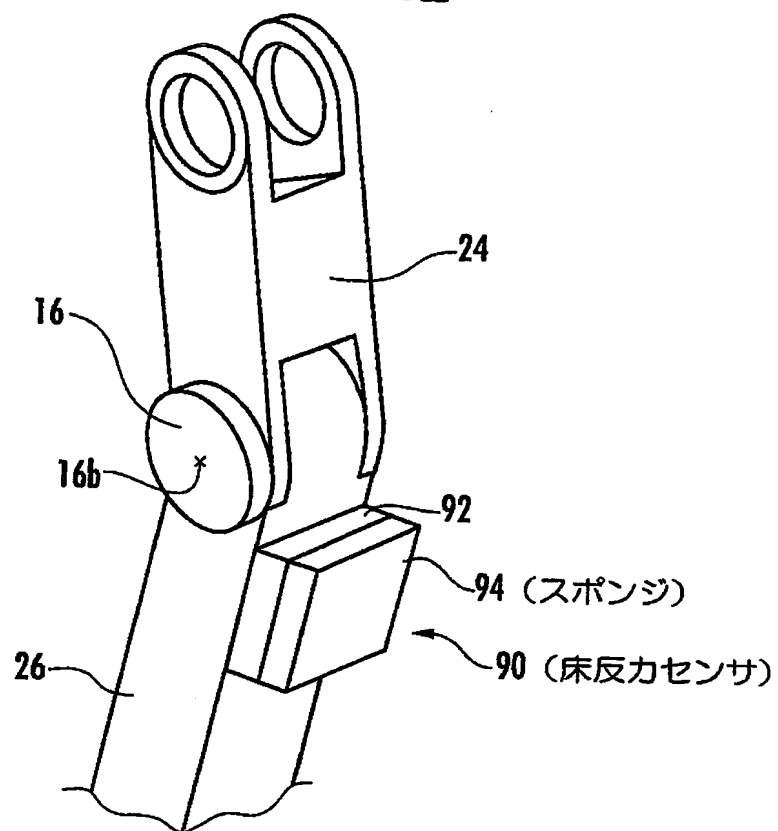
【図 60】

FIG.60
膝に床反力センサを備えた人間型ロボットの図



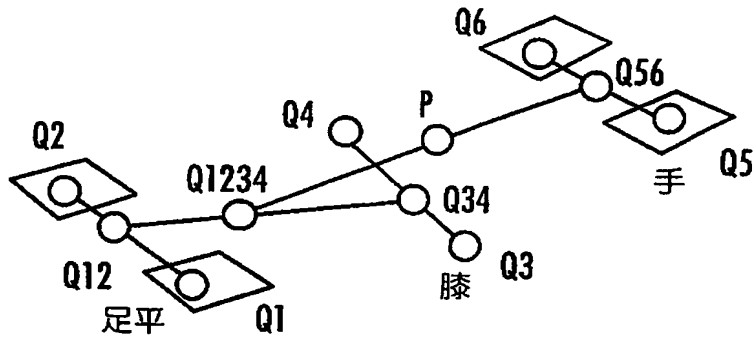
【図 61】

FIG.61
膝に床反力センサの図

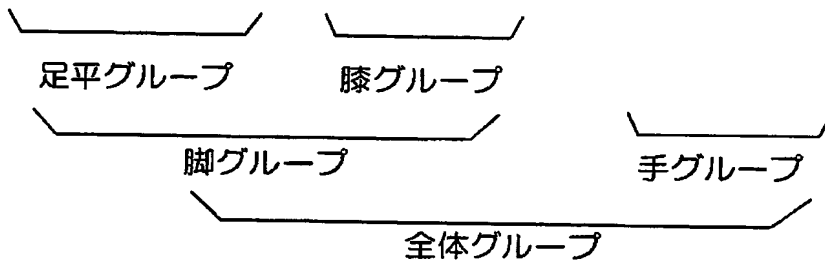


【図 6 2】

FIG.62
ひざまずき時ノード配置



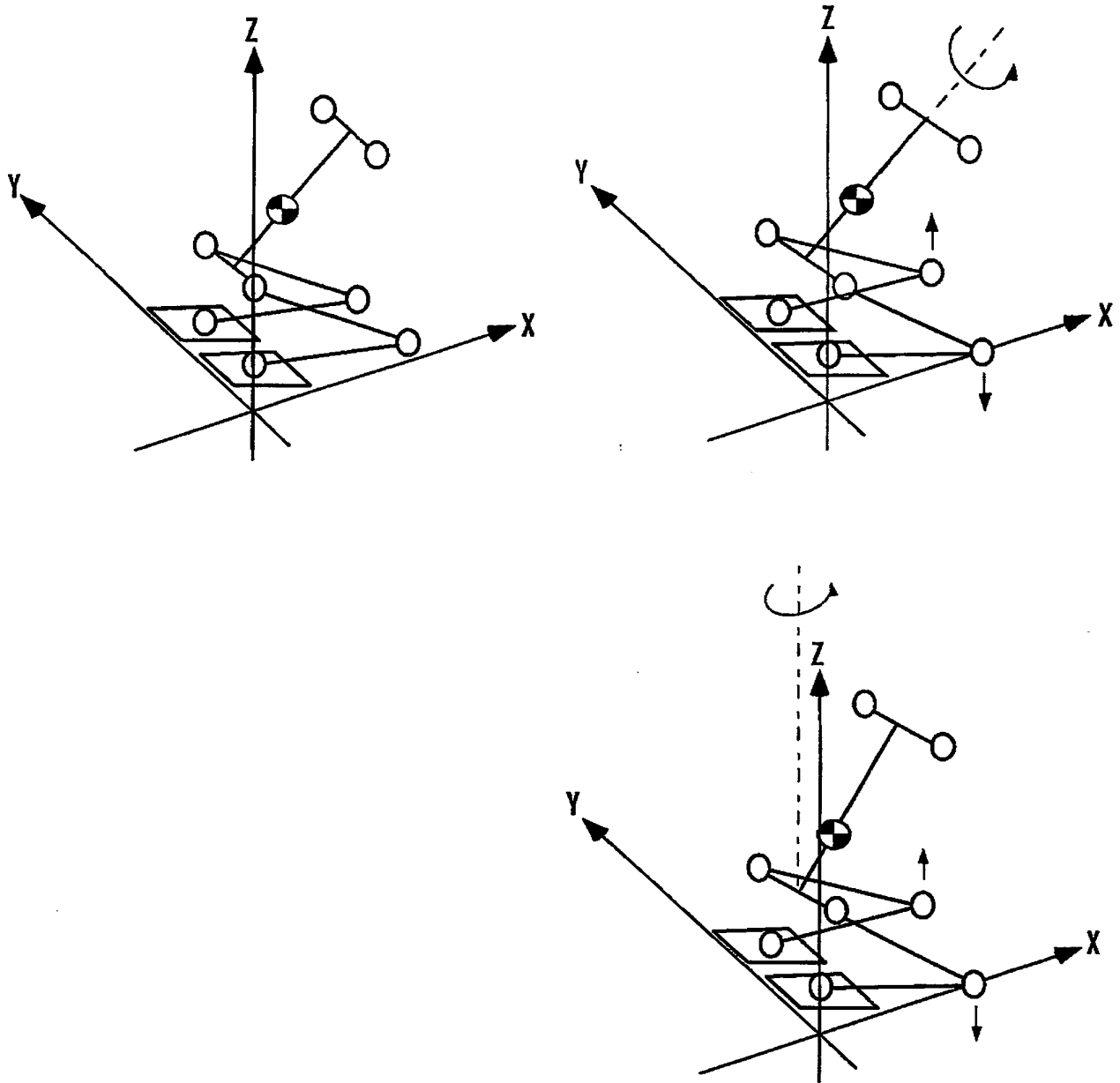
((右足平+左足平) + (右膝+左膝)) + (右手+左手))



【図 64】

FIG.64

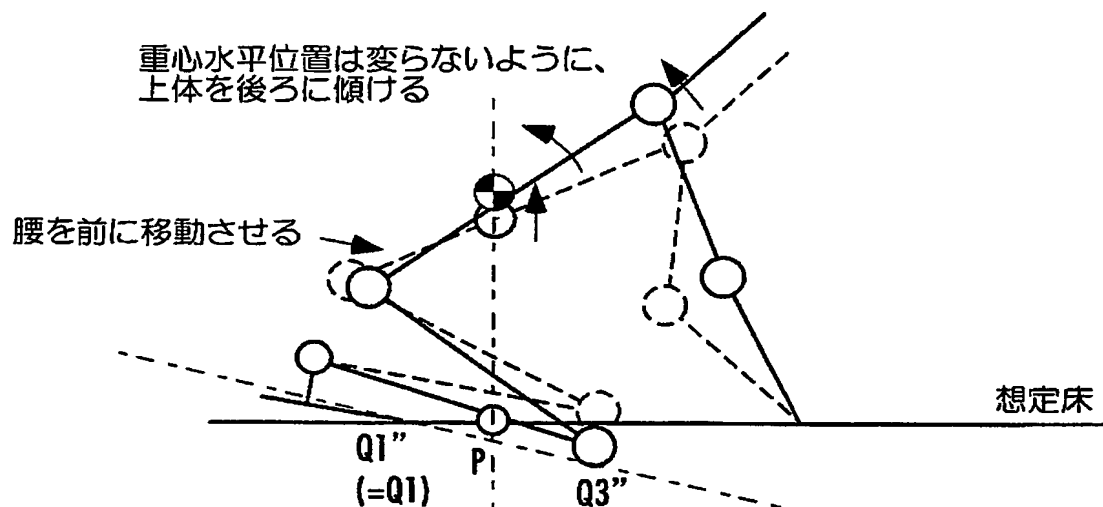
上体体幹軸回り回転を許容したコンプライアンス動作の図



【図 65】

FIG.65

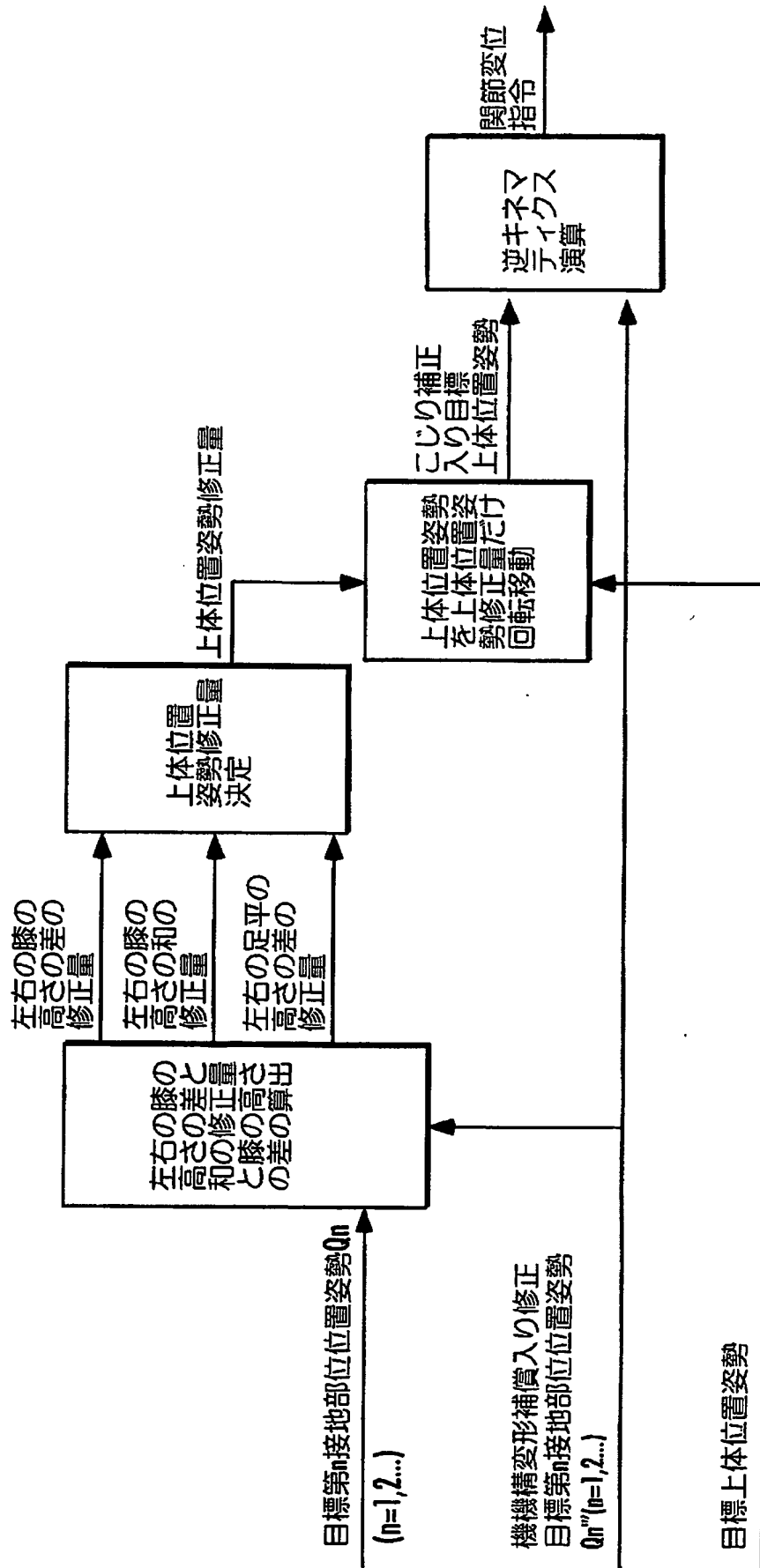
両膝を下げる時の上体位置姿勢修正



【図 66】

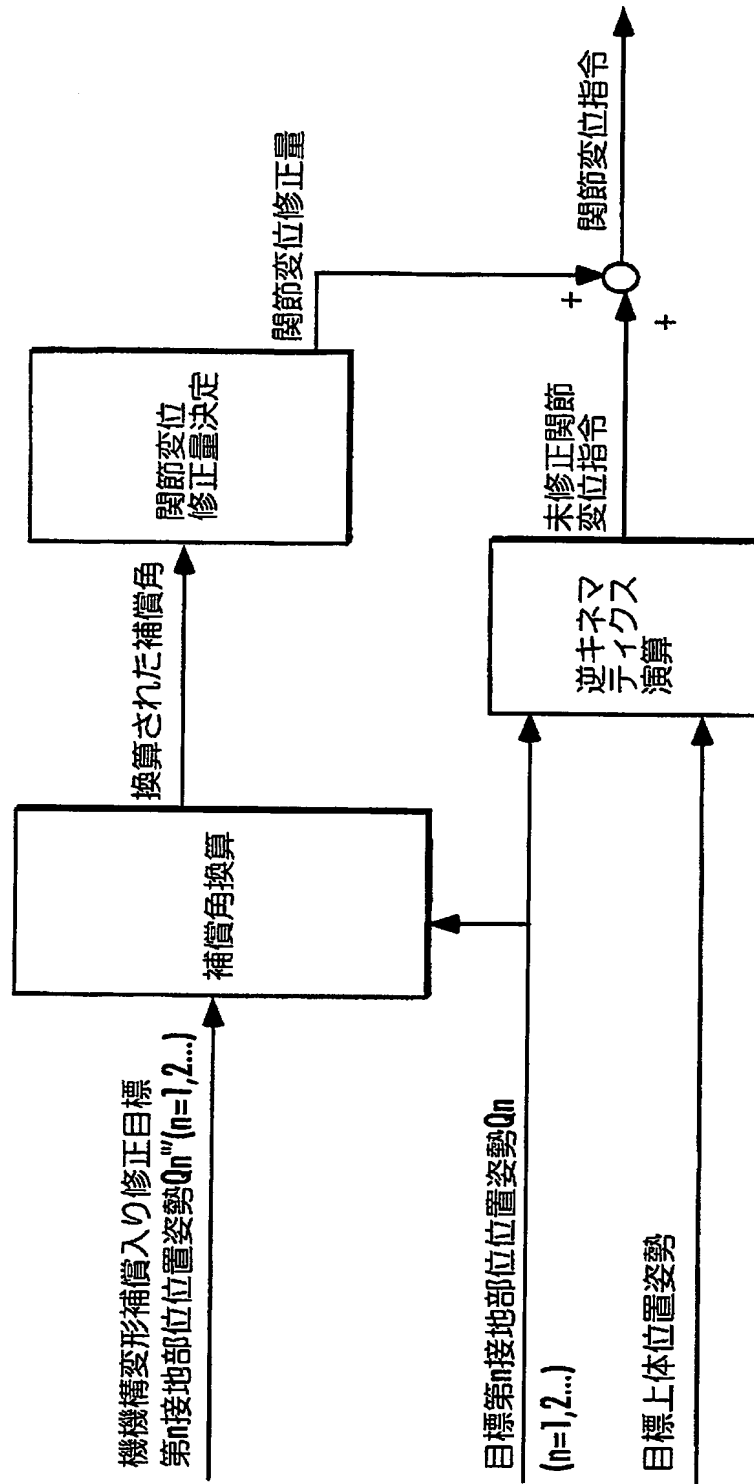
FIG.66

ひざますぎ用逆キネマティクス演算部

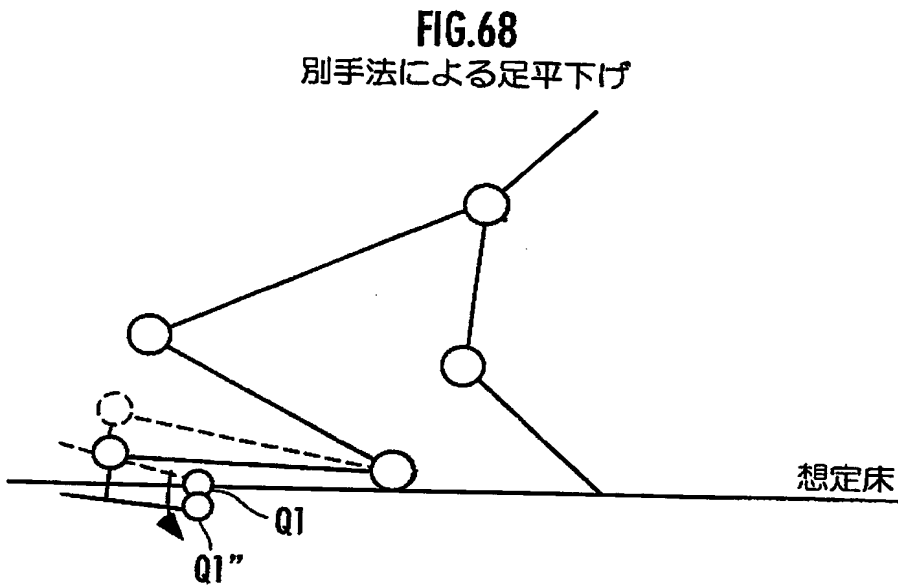


【図 67】

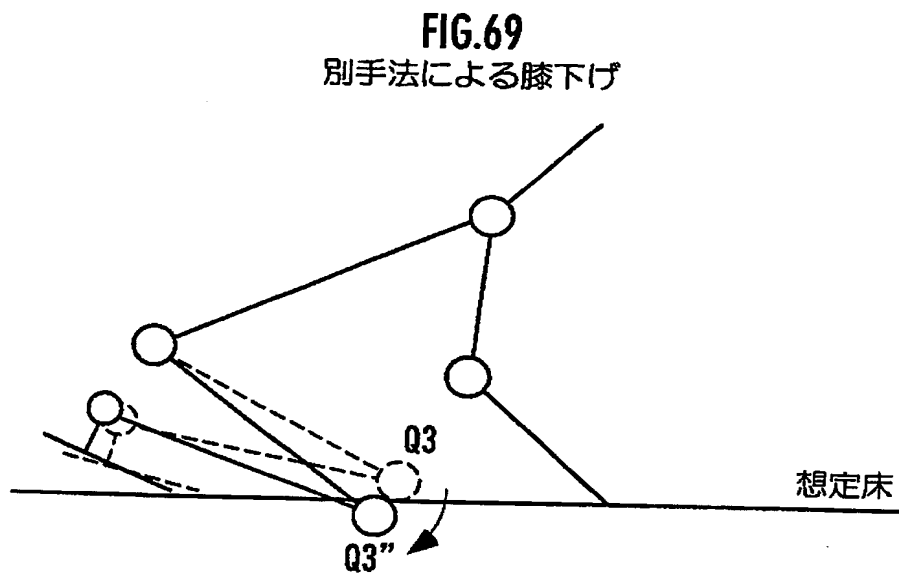
FIG. 67
別手法によるひざまぎ用逆キネマティクス演算部



【図 68】



【図 69】



【図 70】

FIG.70
でん部の床反力センサの図

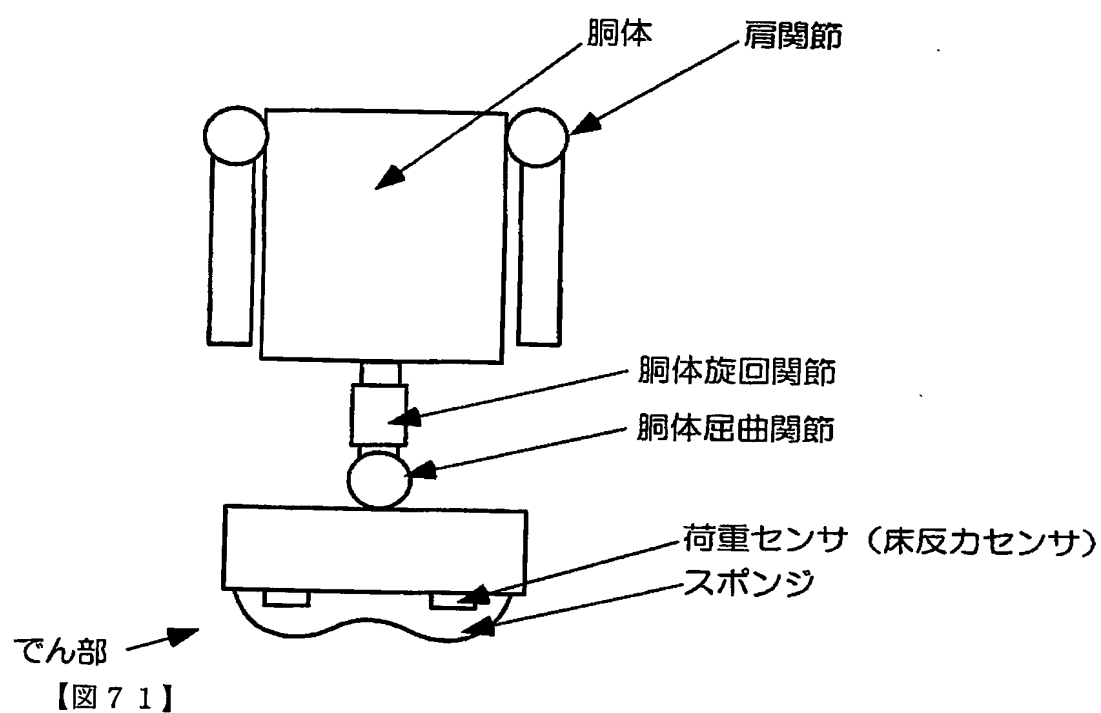
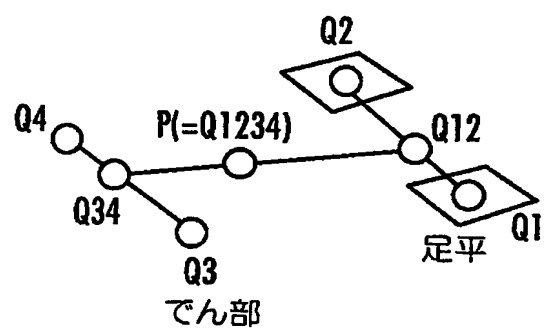


FIG.71
腰掛け時ノード配置



【書類名】要約書

【要約】

【課題】脚式移動ロボットや、アクティブサスペンションを持つ車輪型移動体が接地する床に未知の傾斜や凹凸がある場合にも、その影響を受けにくく適切に床反力を制御する装置を提供することを目的とする。

【解決手段】3つ以上の接地部位を有する移動ロボット等の移動体において、接地部位を葉ノードとしてツリー構造状に分類し、移動体の基体等の所定の部位の目標姿勢に対する実姿勢傾き偏差、あるいは、各ノードの床反力に応じて、ある中間ノードの子ノードの相対高さを修正し、それによって接地部位の相対高さを修正して、移動体の姿勢安定性を保つ。

【選択図】図1

特願 2 0 0 3 - 3 9 8 1 7 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 5 3 2 6]

1. 変更年月日	1 9 9 0 年 9 月 6 日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都港区南青山二丁目 1 番 1 号
氏 名	本田技研工業株式会社

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP04/018096

International filing date: 29 November 2004 (29.11.2004)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP
Number: 2003-398171
Filing date: 27 November 2003 (27.11.2003)

Date of receipt at the International Bureau: 24 February 2005 (24.02.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse